

Universidad Pública de Navarra

Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales



**Adaptación de un motor de combustión interna alternativo  
de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como  
combustible. Aplicaciones energética y de automoción.**

Memoria presentada para optar al grado de Doctor.

Por David Sáinz Casas

Directores de Tesis:

Pedro Diéguez Elizondo y Luis Gandía Pascual

Noviembre de 2014

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, que siempre me ha apoyado para continuar mis estudios universitarios. En especial dedico este trabajo a María, que ha sido un pilar fundamental durante todos estos años en el trabajo que he estado desarrollando.

Quiero agradecer el gran apoyo recibido por parte de mis codirectores de tesis, Pedro y Luis, que me han orientado magníficamente en el desarrollo de la tesis. Por otra parte quiero agradecer a Pedro, como director del Grupo Hidrógeno, y a todos sus integrantes la oportunidad de haber trabajado con ellos todos estos años y lo mucho que he aprendido con ellos. Gracias a José Carlos por lo mucho que he aprendido de él y los buenos recuerdos del día a día en talleres. Gracias a Luis por su gran visión estratégica, su gran criterio y su maestría en las publicaciones. Quiero dedicar este trabajo muy especialmente a Carlos Sopena, que hace tiempo que falta entre nosotros, y a quien le hubiera hecho especial ilusión todo el trabajo desarrollado.

Y gracias en general a todos los que de una u otra forma habéis compartido conmigo todos estos años de trabajo, Santos, José y tantas más personas, compartiendo charlas, reuniones, almuerzos, chistes... y que me habéis hecho crecer como persona.

Hay que reconocer también a Acciona, de la mano de Eugenio Guelbenzu, el apoyo fundamental brindado para el desarrollo de investigación en torno al hidrógeno. También quiero agradecer a Volkswagen Navarra el apoyo recibido en forma de donaciones de motores y vehículos para la investigación.

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	El hidrógeno en el sistema energético .....	1
1.2	Objetivos .....	5
1.3	Instalaciones en la celda de motores .....	7
1.3.1	Sistema de adquisición de datos .....	8
1.3.2	Instalación de hidrógeno .....	13
1.3.3	Sensores de hidrógeno y panel de control.....	14
1.3.4	Renovación del aire en la celda de motores.....	17
1.3.5	Medidas pasivas de seguridad.....	17
2	PUBLICACIONES CIENTÍFICAS QUE CONSTITUYEN LA MEMORIA DE LA TESIS DOCTORAL .....	19
2.1	Contenido y estructura de la memoria de tesis doctoral.....	19
2.2	Artículo I: “ <i>Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline</i> ” .....	23
2.3	Artículo II: “ <i>Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit</i> ” .....	34
2.4	Artículo III: “ <i>Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline)</i> ” .....	47

2.5	Indicios de calidad.....	57
3	RESUMEN DE LOS RESULTADOS.....	61
3.1	Introducción.....	61
3.2	Adaptación de un motor de gasolina VW al funcionamiento con hidrógeno...	61
3.3	Adaptación de un grupo electrógeno al funcionamiento con hidrógeno.....	71
3.4	Adaptación de un VW Polo a su funcionamiento dual gasolina/hidrógeno.....	79
3.5	Conclusiones generales .....	87
3.6	Líneas de futuro.....	90
4	BIBLIOGRAFÍA.....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema que muestra los componentes de la celda de motores. ....	7
Fig. 2. Sistema de adquisición CompacDAQ (izquierda) y control de banco y monitorización de datos (derecha).....	9
Fig. 3. Software de captura (izquierda) y parte de su programación gráfica (derecha). .....	10
Fig. 4. Bujía instrumentada Kistler (izquierda) y encoder de cigüeñal Kistler (derecha). ....	10
Fig. 5. Programación gráfica en Labview del sistema de monitorización de la presión en el interior del cilindro. ....	11
Fig. 6. Ejemplo de ciclo medio (izquierda) y ciclo indicado (derecha) de los 200 ciclos capturados en un ensayo.....	12
Fig. 7. Parte de la instalación de gases correspondiente a la ubicación de las botellas de $H_2$ y $N_2$ . ....	13
Fig. 8. Detalle de los sensores de hidrógeno instalados en la celda de motores (arriba) y del panel de detección de hidrógeno y mando de control (abajo). ....	15
Fig. 9. Extractor de aire para la renovación de aire de la celda (izquierda) y extractor de humos (derecha).....	17
Fig. 10. Comparación de la presión media efectiva con gasolina y con hidrógeno a diferentes dosados y velocidad del motor.....	64

Fig. 11. Comparación de la potencia del motor alimentado con gasolina y con hidrógeno ( $\lambda = 1,6$ ).....	64
Fig. 12. Consumo específico con gasolina y su equivalente con hidrógeno a diferentes dosados. ....	65
Fig. 13. Emisión de NOx para el funcionamiento con hidrógeno a diferentes dosados. ....	66
Fig. 14. Variación de las emisiones de NOx con respecto al avance óptimo ( $\lambda = 1,6$ ). ....	68
Fig. 15. Variación del NOx y del par motor con respecto al avance óptimo ( $\lambda = 2$ ). ....	69
Fig. 16. Potencia requerida por el vehículo y potencia entregada por el motor ( $\lambda = 1,6$ ).....	70
Fig. 17. Grupo electrógeno de gasolina original (A) y tras la conversión a funcionamiento dual (B).....	71
Fig. 18. A: Orientación de los inyectores de hidrógeno (1) y gasolina (2) en el colector de admisión (3). B: Montaje del sistema de alimentación de gasolina e hidrógeno.....	72
Fig. 19. Magneto transistorizado de origen (izquierda) y una de las bobinas electrónicas instaladas (derecha). ....	73
Fig. 20. Disco dentado y sensor del árbol de levas (izquierda), sensor y disco dentado del cigüeñal (derecha).....	73
Fig. 21. Sensor de posición de mariposa en el carburador anulado (izquierda) y	

sensor de oxígeno en el escape (derecha).....	74
Fig. 22. Esquema eléctrico de todos los elementos eléctricos del grupo electrógeno. .....	75
Fig. 23. Driver de inyectores de hidrógeno (izquierda) y unidad electrónica ECU (centro).....	75
Fig. 24. Valor de lambda ( $\lambda$ ) utilizado (A) y avance al encendido (B) en función de la carga eléctrica. ....	76
Fig. 25. Consumo específico de combustible(A) y rendimiento efectivo (B) para gasolina e hidrógeno.....	77
Fig. 26. Emisiones de hidrocarburos (A) y de NO <sub>x</sub> (B) para gasolina (rojo) e hidrógeno (azul).....	77
Fig. 27. Emisiones de hidrocarburos (A) y de NO <sub>x</sub> (B) para gasolina (rojo) e hidrógeno (verde). ....	79
Fig. 28. Vehículo Volkswagen Polo modificado para su funcionamiento dual (gasolina/hidrógeno).....	80
Fig. 29. Acumulador e inyectores de hidrógeno (izquierda) y alimentación de hidrógeno en vano motor (derecha).....	81
Fig. 30. Botellas de hidrógeno instaladas en el maletero del vehículo.....	81
Fig. 31. Vista del vano motor donde se ven las unidades electrónicas y la caja de conexiones. ....	82

Fig. 32. Esquema eléctrico de la caja de conexiones del vehículo. ....	82
Fig. 33. Potencia máxima del motor funcionando con hidrógeno a diferentes dosados. .....	83
Fig. 34. Potencia máxima del motor funcionando con hidrógeno a diferentes dosados. .....	84
Fig. 35. Comparación en la aceleración con diferentes marchas entre gasolina e hidrógeno. ....	84
Fig. 36. Emisión de NO <sub>x</sub> y estimación de los NO <sub>x</sub> emitidos por kilómetro en diferentes condiciones. ....	85
Fig. 37: Señales de presión en el cilindro y de sonido de una combustión normal (izqda.) y detonación (drcha.).....	90



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 El hidrógeno en el sistema energético

Durante los últimos años, los mayores desafíos de la política energética y medioambiental en la Unión Europea han sido implementar una serie de políticas y medidas destinadas a mitigar el calentamiento global, mejorar la calidad del ambiente y reducir el consumo energético. Para el año 2050 se han establecido unos objetivos globales en la Unión Europea (UE) para posibilitar la reducción del 80-95 % (en relación al año 1990) en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1].

En concreto en el sector del transporte, responsable aproximadamente del 25 % de las emisiones de GEI, se ha establecido el objetivo de reducción del 60 % en la emisión de GEI para el año 2050 [2]. Los vehículos, mayoritariamente con motores de combustión, generan principalmente óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La emisión de  $\text{NO}_x$  se puede reducir mediante convertidores catalíticos en los sistemas de escape. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  se pueden reducir disminuyendo el consumo de los vehículos, utilizando biocombustibles que dan lugar a emisiones netas más bajas, hibridando con motores eléctricos, o utilizando vehículos eléctricos o de hidrógeno [3].

El hidrógeno puede llegar a constituirse en uno de los soportes básicos del futuro modelo energético ya que, usado como combustible para el transporte, puede aliviar los problemas de contaminación atmosférica en áreas urbanas, potenciar los recursos energéticos propios y reducir las emisiones de GEI siempre que este combustible se obtenga a partir de fuentes de energía primaria renovables. No obstante, a corto y medio

plazo, se espera que su producción va a seguir siendo mayoritariamente a partir de recursos fósiles (gas natural y carbón) [4].

Existen dos líneas tecnológicas para el empleo del hidrógeno en automoción como son los motores de combustión interna alimentados por hidrógeno o *H<sub>2</sub>ICEs (Hydrogen Internal Combustion Engines)* y las pilas de combustible de hidrógeno o *H<sub>2</sub>FCs (Hydrogen Fuel Cells)*. Las pilas de combustible de hidrógeno convierten directamente el hidrógeno en energía eléctrica, mientras que los motores de combustión queman el hidrógeno produciendo energía mecánica.

Las pilas de combustible han experimentado avances tecnológicos importantes en los últimos años, demostrando su capacidad para contribuir en un futuro a un sector del transporte más sostenible, con cero emisiones contaminantes y de efecto invernadero a nivel local [5,6]. Un número de programas demostrativos de autobuses y la implementación de pilas de combustible de alta densidad de potencia en numerosos prototipos de vehículos eléctricos de pila de combustible o *FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles)* han demostrado el gran potencial de esta tecnología. Sin embargo, existen todavía obstáculos que superar antes de que *H<sub>2</sub>FCs* y *FCEVs* estén ampliamente disponibles en el mercado, como son su elevado coste, la gran pureza del hidrógeno necesario, mejorar la fiabilidad y la optimización de los sistemas de pila de combustible [5]. Se requerirán inversiones económicas sustanciales para el desarrollo de toda la cadena de producción, almacenamiento y uso del hidrógeno. Las mejores previsiones estiman que los *FCEVs* pueden hacerse competitivos con otras tecnologías en algunos países en el periodo 2025-2030 [7].

Los motores de combustión interna de hidrógeno son una tecnología disponible y fiable. La actual infraestructura de la industria automovilística y la notable experiencia en el diseño y adaptación al uso de hidrógeno de vehículos alimentados por combustibles convencionales hacen que esta opción tecnológica también resulte atractiva [9-11]. De hecho, algunos fabricantes como BMW, Ford, Mazda o MAN han desarrollado o están desarrollando vehículos con motores de combustión interna alternativos de encendido provocado alimentados por hidrógeno. La tecnología de los *H<sub>2</sub>ICEs* tiene potencial para estimular el desarrollo de la economía del hidrógeno, como tecnología de transición en el sector del transporte mientras se terminan de desarrollar las alternativas basadas en pila de combustible y configuraciones híbridas [9,12]. A este respecto, es muy relevante la posibilidad de fabricar motores capaces de funcionar indistintamente con gasolina (o gas natural) e hidrógeno [8]. Esta característica podría ser esencial durante el periodo de transición para una rápida introducción del hidrógeno en el sector del transporte [13].

La utilización de motores *H<sub>2</sub>ICEs* aplicados a la generación de energía eléctrica también puede jugar un importante papel para aplicaciones que precisan de unidades de potencia auxiliar y fuentes de energía para sistemas descentralizados. La producción y almacenamiento de hidrógeno empleando los excedentes de electricidad renovable producidos con fuentes discontinuas como la eólica y solar suponen una combinación ideal para potenciar la integración de las energías renovables en el sistema de generación de energía. También se reduciría la dependencia de las centrales de ciclo combinado y nucleares [14].

En esta memoria se presentan los trabajos de investigación realizados recientemente en la Universidad Pública de Navarra sobre la conversión de motores de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno, así como el desarrollo de aplicaciones demostrativas prácticas empleando estos motores. Esta línea de investigación es continuación de la producción electrolítica de hidrógeno con energía eólica [15-17]. Los proyectos de investigación asociados a estas líneas de trabajo han sido desarrollados gracias a la financiación de Acciona Energía, empresa cuyas actividades se centran en el sector de las energías renovables.

## 1.2 Objetivos

Dentro del contexto expuesto en el apartado anterior, el objetivo principal de este trabajo es la demostración práctica de la viabilidad de la conversión de motores de encendido provocado de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno. Para la consecución del objetivo principal de este trabajo ha sido necesaria la consecución de objetivos secundarios como son: la habilitación de la celda de ensayos, instalación del motor y sus modificaciones y la instalación del sistema de adquisición y tratamiento de datos.

La habilitación de la celda de ensayos consistió en la ejecución de una instalación de suministro de gases comprimidos y de sensores de detección de hidrógeno en aire dentro de la celda. El sistema actúa de manera que, ante la detección de una pequeña cantidad de hidrógeno dentro de la celda, se cierra el suministro de hidrógeno y se purga el sistema con nitrógeno, pudiendo así realizar ensayos con seguridad.

Para lograr el correcto funcionamiento del prototipo de motor de hidrógeno en la celda de ensayos fueron necesarias modificaciones mecánicas en el motor. Las principales modificaciones se realizaron en el sistema de inyección, en el que se eliminó la rampa de inyección de gasolina existente y se incorporó una rampa de inyección de hidrógeno en el colector de admisión. Se incorporó también un intercambiador aceite-agua junto al filtro de aceite para evitar posibles sobrecalentamientos del lubricante, refrigerándolo mediante el circuito de agua. También fue necesario instalar una unidad electrónica de control programable (ECU) en lugar de la unidad de serie, que junto con los sensores de serie del motor y los nuevos inyectores permitirían la programación y

control del motor.

Una vez se consiguió poner en marcha el motor con hidrógeno, se instaló un sistema de adquisición de datos para poder monitorizar y adquirir los datos de los ensayos. Se fueron añadiendo sensores como el caudalímetro de hidrógeno, el sensor de presión en el cilindro y un *encoder* en el cigüeñal, que junto a los datos de par motor y régimen proporcionados por el banco de ensayos, permitirían estudiar el rendimiento del motor. Para la monitorización y adquisición de datos se programaron una serie de programas mediante el software *Labview*. Hay que destacar como logro importante por su complejidad la programación para la monitorización y captura de la presión en el interior del cilindro, que permite la visualización y captura del ciclo indicado.

Como objetivos derivados del prototipo de motor instalado en la celda de ensayos se planteó desarrollar ejemplos de demostración práctica de los motores de encendido provocado de hidrógeno: un grupo electrógeno y un automóvil. Dichas aplicaciones prácticas han sido objeto de las publicaciones incluidas en esta memoria.

### 1.3 Instalaciones en la celda de motores

Todo el trabajo experimental de esta tesis se ha realizado en el laboratorio de motores térmicos “Carlos Sopena” ubicado en el edificio de talleres de la Universidad Pública de Navarra en Pamplona. Más concretamente, el motor fue instalado en la celda de ensayos que está disponible en este laboratorio. Se trata de una celda insonorizada que cuenta con un banco de ensayos para motores y que dispone de la adecuada renovación de aire y extracción de humos, así como de una instalación para el suministro de gases y los sistemas de seguridad, tal y como se esquematiza en la Figura 1.

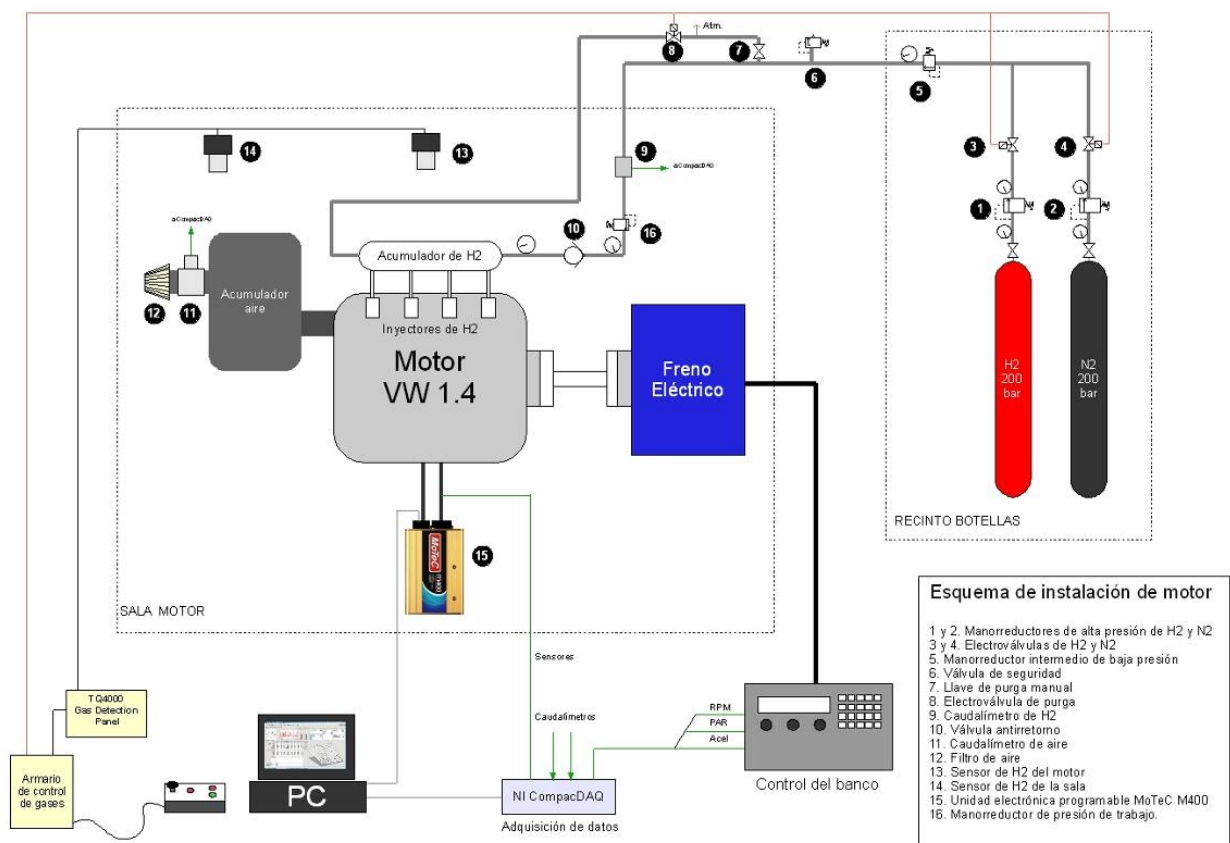


Fig. 1. Esquema que muestra los componentes de la celda de motores.

La celda de ensayo de motores cuenta con un freno electromagnético de corrientes parásitas *AVL-80* capaz de medir potencias de hasta 80 kW y con un sistema de control *BME-300* que permite manejar el freno con cuatro modos de control: par motor efectivo-posición del acelerador, par motor efectivo-régimen de giro, régimen de giro-posición del acelerador y régimen de giro-par motor efectivo.

El freno electromagnético mide el par motor efectivo por medio de una célula de carga. También mide el régimen de giro del motor mediante un sensor inductivo y permite variar la posición del acelerador mediante un motor paso a paso. Además permite conectar el equipo al sistema de adquisición de datos para registrar todas las mediciones.

El motor es gestionado por una unidad electrónica de control *MoTeC M400*, que dispone de un *Data Logger* que permite registrar los parámetros de funcionamiento del motor: tiempos de inyección, avance al encendido, temperaturas, dosado, etc.

### **1.3.1 Sistema de adquisición de datos**

Con el objeto de tener información del comportamiento del motor durante los ensayos, se incorporó un sistema de adquisición de datos *NI CompacDAQ* (véase la Figura 2). El banco de motores está conectado al sistema de adquisición para el registro de los parámetros de funcionamiento de éste: par motor y régimen de funcionamiento.





Fig. 2. Sistema de adquisición CompacDAQ (izquierda) y control de banco y monitorización de datos (derecha).

Para la medición del caudal del aire de admisión se instaló una cámara de remanso y un medidor de caudal másico de aire *Bronkhorst*. Para medir el caudal de hidrógeno se instaló en la línea de alimentación del motor otro medidor de caudal másico (*Bronkhorst*). Ambos dispositivos están conectados al sistema de adquisición de datos para su monitorización y registro. Para la medición de  $\text{NO}_x$  se instaló en el escape del motor un analizador *HORIBA MEXA 720NOx*, que utiliza un sensor de oxígeno *UEGO*, y que se conecta también al sistema de adquisición de datos.

La captura de los valores de todos estos parámetros resulta de gran ayuda de cara a la realización de ensayos en el motor. A través de estos ensayos es posible estudiar el consumo y las emisiones del motor en un determinado punto de operación para poder así optimizar su funcionamiento.

La adquisición y tratamiento de estas señales se hace a través del software *LabView*. Para ello se desarrolló un programa en entorno *LabView* que se encarga de adquirir, convertir a sus magnitudes reales, presentarlas en tiempo real y registrarlas en archivos (véase la Figura 3).

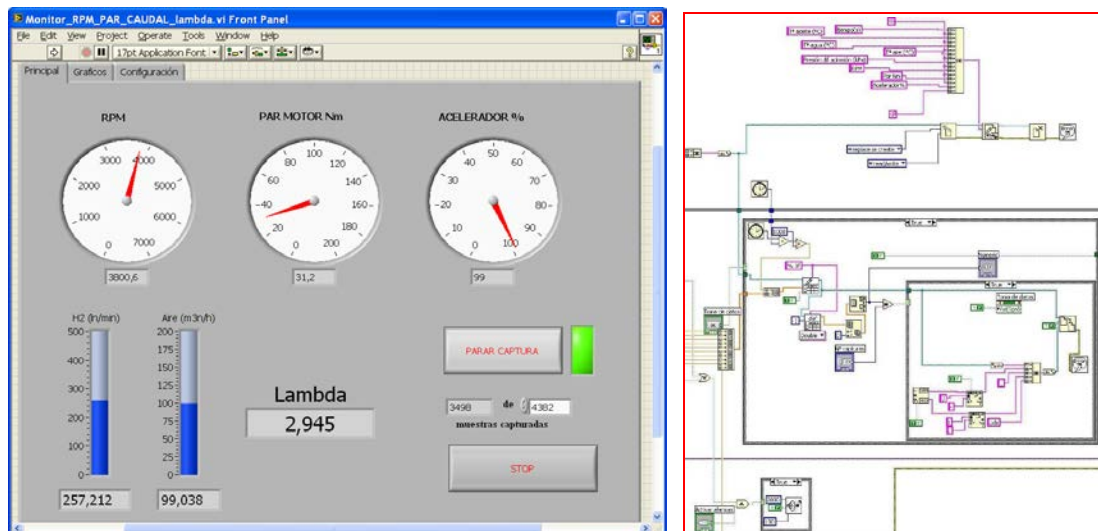


Fig. 3. Software de captura (izquierda) y parte de su programación gráfica (derecha).

Para profundizar en el análisis de la combustión del motor, se instaló y puso a punto un sistema de medición de presión en el interior del cilindro. El sistema consta de una bujía instrumentada *Kistler*, que lleva incorporado un sensor de presión piezoeléctrico y un encoder *Kistler*, capaz de dar una señal con resolución de 0,2° de giro del cigüeñal (Figura 4). Ambos se conectan al sistema de adquisición de datos NI CompacDAQ.



Fig. 4. Bujía instrumentada Kistler (izquierda) y encoder de cigüeñal Kistler (derecha).

Los datos proporcionados por el sensor de presión y el encoder permiten, a través de un programa creado en *LabView* (Figura 5), la obtención de la variación de presión con el giro del cigüeñal, pudiendo obtener el ciclo indicado del motor.

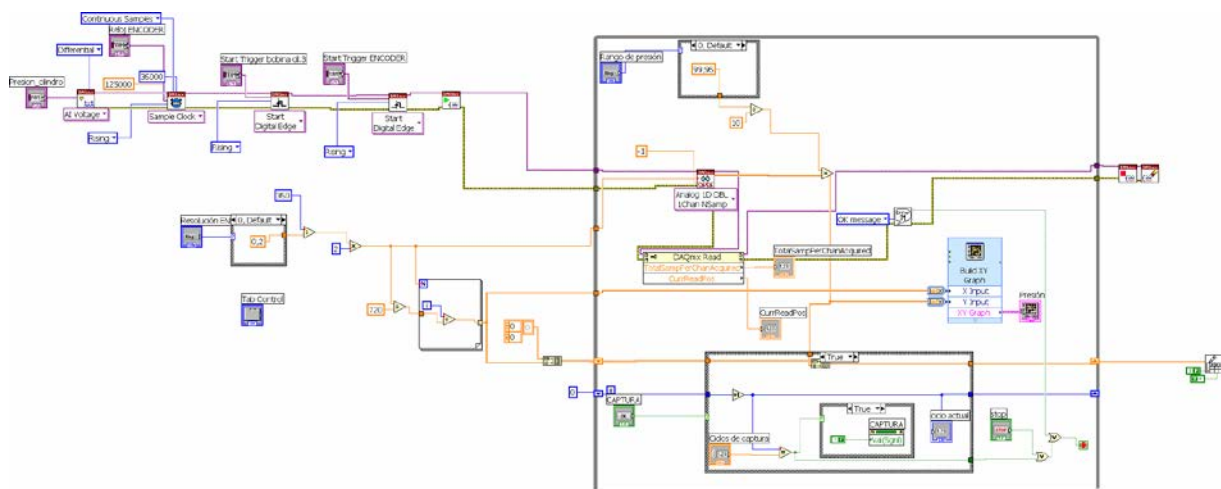


Fig. 5. Programación gráfica en Labview del sistema de monitorización de la presión en el interior del cilindro.

Con este nuevo programa se pueden registrar hasta 1.800 valores de presión por cada giro del eje del cigüeñal (una señal cada  $0,2^\circ$ ), que suponen unas 150.000 muestras por segundo a 5.000 rpm. En la práctica no se capturan más de 250 ciclos de motor debido a la limitación de 256 columnas en *Excel*. De forma adicional se realizó una rutina de cálculo en *Matlab* para elaborar la gráfica del ciclo indicado medio y otros resultados como el cálculo del trabajo indicado, tal y como se observa en la Figura 6.

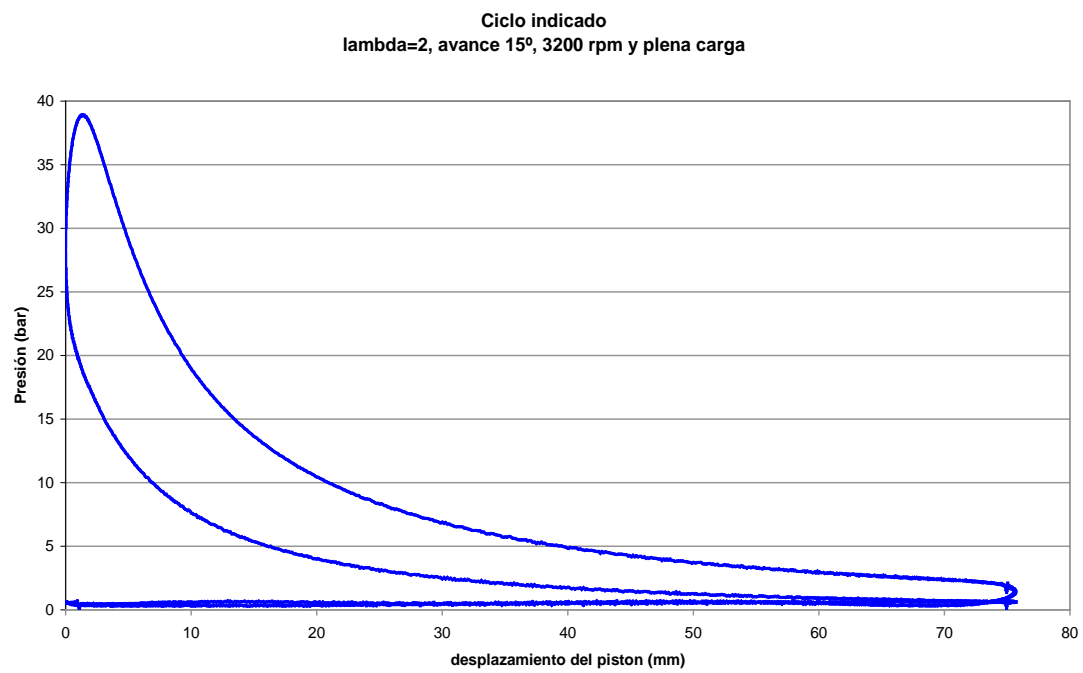
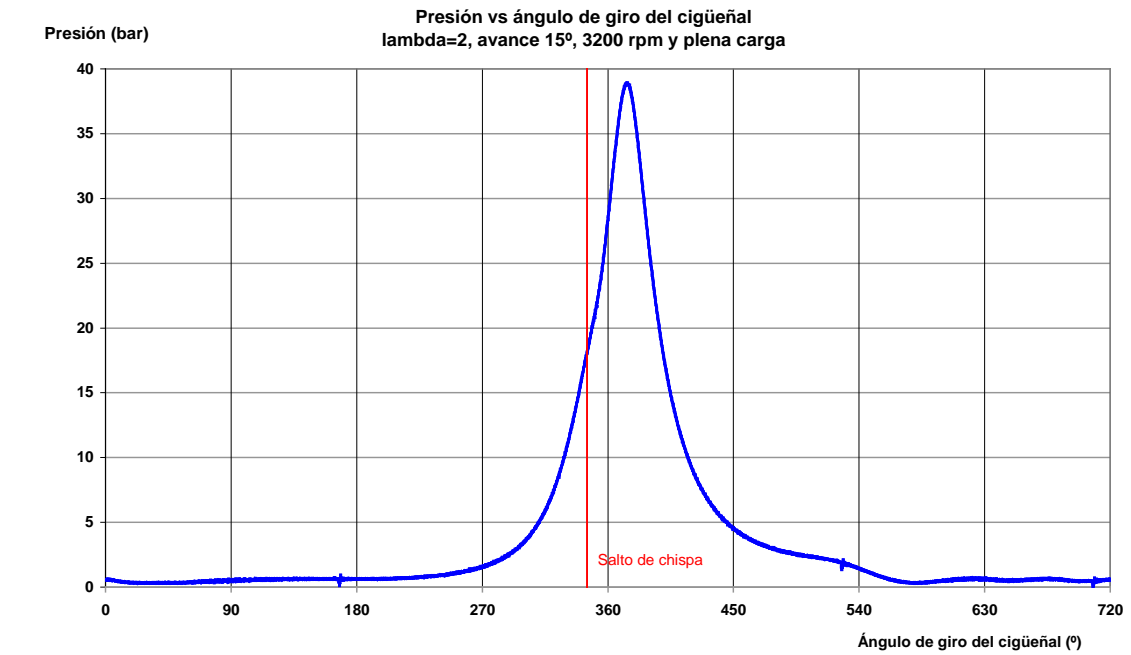


Fig. 6. Ejemplo de ciclo medio (arriba) y ciclo indicado (abajo) de los 200 ciclos capturados en un ensayo.

### 1.3.2 Instalación de hidrógeno

La instalación de hidrógeno destinada al funcionamiento del motor se ha diseñado conforme a las siguientes características:

- Caudal de hidrógeno suficiente para llevar el motor a su plena potencia.
- Nitrógeno como inerte para purgar en caso necesario.
- Capacidad de detección de fugas de hidrógeno mediante sensores.
- Sistema de control de la alimentación con purga automática.

La instalación de hidrógeno, llevada a cabo por *Air Liquide*, consiste en una botella (B50, 200 bar) de hidrógeno y otra de nitrógeno, ubicadas fuera de la celda de motores. Desde allí y a través de los diferentes manorreductores y electroválvulas se canaliza el combustible gaseoso a través de tubos de acero inoxidable que llegan dentro de la celda de motores.



Fig. 7. Parte de la instalación de gases correspondiente a la ubicación de las botellas de  $H_2$  y  $N_2$ .

Hasta la celda de motores llegan dos líneas de acero inoxidable: una línea es de alimentación y otra de purga. Las botellas alojan una presión inicial de unos 200 bar, que a través de los manorreductores principales se reduce a unos 10 bar. Tanto la línea de hidrógeno como la de nitrógeno tiene su propia electroválvula y a su salida se unen en una línea común, a fin de poder suministrar hidrógeno o purgar con nitrógeno, en función de la consigna del sistema de seguridad. A continuación hay otro manorreductor que reduce la presión a unos 8 bar y estabiliza completamente la presión. Existe otra electroválvula de purga, que barre todo el hidrógeno acumulado en la línea que va hasta el motor, arrastrando el combustible al exterior (Figura 7).

La línea de alimentación, una vez dentro de la celda de motores, lleva incorporados un caudalímetro de hidrógeno anclado a la pared, y al final de la línea, un manorreductor y una válvula antirretorno. Este manorreductor reduce la presión hasta la presión de trabajo del acumulador de hidrógeno, que es de unos 3 bar. La válvula antirretorno está presente por si accidentalmente sucediera un retorno de llama o *backfire*. En paralelo a la línea de alimentación del hidrógeno va otra línea de retorno del combustible que va conectada al acumulador del motor. Esta línea de retorno permite la purga del sistema y va conectada a la electroválvula de purga. En la Figura 1 se puede ver con más detalle un esquema de la instalación con todos sus elementos.

### **1.3.3 Sensores de hidrógeno y panel de control**

Al utilizar un gas combustible como el hidrógeno se hacen necesarias especiales medidas de seguridad. Se han instalado dos sensores de hidrógeno dentro de la celda de



motores, uno justo encima del motor y otro en una pared de la celda en una posición más elevada. La Figura 8 muestra la ubicación de los sensores de hidrógeno así como el panel de detección de gases TQ4000 y su correspondiente mando de control.



Fig. 8. Detalle de los sensores de hidrógeno instalados en la celda de motores (arriba) y del panel de detección de hidrógeno y mando de control (abajo).

El panel de detección muestra el contenido de hidrógeno del ambiente en porcentaje con respecto al límite inferior de inflamabilidad en aire o %LEL (*Low Explosive Level*) medido por los sensores. Es capaz de activar dos alarmas a diferentes porcentajes predefinidos de hidrógeno. Al 22% del LEL se activa la alarma como aviso y si supera el 47% del LEL automáticamente cierra la electroválvula de hidrógeno y abre la de nitrógeno y purga.

Para poder usar el hidrógeno con seguridad se ha instalado un panel de control con un par de pulsadores, una luz indicadora y un botón de emergencia. El sistema se ha configurado de la siguiente forma:

#### *Pulsador de paro/reset:*

Con este pulsador se para en estado normal cerrando la válvula de hidrógeno. O bien, una vez que se ha producido la alarma y ésta ha desaparecido (piloto rojo no parpadea) permite mediante pulsación continuada (3 s) el reseteo del sistema.

El reseteo lleva asociado una purga de hidrógeno, que consiste en la apertura de las válvulas de hidrógeno y purga simultáneamente de forma que el circuito se llene sólo con hidrógeno, arrastrando al exterior otros gases que estuvieran en el circuito (nitrógeno o aire). El tiempo de purga por defecto es de 5 s.

#### *Pulsador piloto de marcha:*

En estado de reposo el pulsador de marcha activa la electroválvula de hidrógeno (el piloto se enciende) y con el pulsador de paro se cierra, dejando el circuito con hidrógeno.

#### *Piloto de alarma:*

Este piloto parpadea si el problema está activo y queda fija cuando se ha eliminado, pudiendo entonces resetear el sistema.

#### *Botón de emergencia:*

Al pulsarlo el sistema cierra la válvula de hidrógeno e inicia la purga de nitrógeno. El purgado de nitrógeno consiste en la apertura de las válvulas de nitrógeno y purga simultáneamente de forma que cualquier acumulación de hidrógeno que hubiese sea arrastrada hacia el exterior. De esta forma el circuito queda lleno de nitrógeno. Una vez



realizada la purga el sistema se bloquea y atiende al reseteo posterior.

#### 1.3.4 Renovación del aire en la celda de motores

Como medida de seguridad complementaria se ha instalado un extractor en el techo de la sala que renueva por completo el aire de la sala cada minuto. También existe un extractor de humos que expulsa los gases calientes procedentes del escape del motor.



*Fig. 9. Extractor de aire para la renovación de aire de la celda (izquierda) y extractor de humos (derecha).*

#### 1.3.5 Medidas pasivas de seguridad

En el hipotético caso de que se produjera un incendio, se dispone de un extintor de nieve carbónica y una máscara antihumos. La causa de incendio más probable es que se incendie el aceite del motor, lo que generaría una densa nube de humo.

En caso de incendio se procederá de la siguiente manera:

- Pulsar el botón de emergencia inmediatamente, aunque haya saltado la alarma.

- Llamar a los bomberos, al 112.
- Ponerse la máscara antihumos (máximo 15 min) y entrar con el extintor y descargarlo sobre el foco del incendio.
- Una vez descargado el extintor, esté o no apagado el foco, salir de la sala y esperar a los bomberos.

## 2 PUBLICACIONES CIENTÍFICAS QUE CONSTITUYEN LA MEMORIA DE LA TESIS DOCTORAL

### 2.1 Contenido y estructura de la memoria de tesis doctoral

Esta memoria de tesis se presenta de acuerdo a la normativa de doctorado de esta universidad (RES. 549/2009, de 2 de abril) que permite la presentación de la tesis en un formato consistente en un compendio de artículos.

La investigación llevada a cabo ha dado lugar por el momento a tres publicaciones científicas (artículos) en la revista *International Journal of Hydrogen Energy* que recogen los principales resultados obtenidos. Esta revista está indexada en el JCR-Sci (*Journal Citation Report, Science Edition*) y según datos de 2013 se encuentra en el segundo cuartil (posición 28 entre 82 revistas) dentro de la categoría de Energía y Combustibles (*Energy & Fuels*), habiendo recibido hasta el momento un total de 36 citas.

El primer artículo tiene por título: “*Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline*”. Este artículo es el fruto del esfuerzo de muchas personas a través del trabajo de varios años mediante contratos de investigación financiados por *Acciona Biocombustibles*.

Mi contribución personal a este trabajo fue a varios niveles, pero se concentró en el diseño e instalación de la electrónica del motor, manteniendo los sensores de origen e incorporando una unidad de control programable y nuevos inyectores de hidrógeno. La programación de los parámetros de sincronización para conseguir el arranque del motor,

la calibración de los sensores y los mapeados iniciales fueron aspectos claves del trabajo. También me encargué del diseño, instalación y programación del sistema de adquisición, captura y tratamiento de datos. La adquisición de sensores de consumo de combustible, prestaciones y emisiones permitió la captura de los diferentes ensayos realizados, lo que posibilitó la optimización del funcionamiento del motor. La incorporación de un sensor de presión en el interior del cilindro asociado a un *encoder* de posición, junto con un software programado en *Labview*, permitió obtener el ciclo indicado del motor, brindando valiosa información sobre la combustión del hidrógeno.

El trabajo que más tiempo ha requerido es el extenso programa experimental desarrollado para obtener los mapeados del motor y para la adquisición de datos. Se realizaron ensayos para elaborar mapas con diferentes dosados, los cuales requerían mapas completamente distintos a los empleados con gasolina y una optimización en cada punto de operación del motor. Estos numerosos ensayos sirvieron también para analizar resultados y extraer conclusiones sobre el funcionamiento del motor.

El segundo artículo tiene por título: “*Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit*”. Este artículo es fruto del trabajo de muchas personas que emplearon muchas horas para su consecución, y fue promovido y financiado por *Acciona Biocombustibles*. Mi contribución personal consistió en el diseño de la electrónica del grupo electrógeno para su funcionamiento dual gasolina/hidrógeno así como en su instalación y programación. La principal novedad con respecto al anterior trabajo con el prototipo del banco de motores fue la posibilidad del funcionamiento con gasolina o hidrógeno mediante un conmutador, ya que es muy interesante esta versatilidad. Además se trataba de un motor completamente

diferente al anterior, especialmente en el hecho de que era un motor completamente mecánico que hubo que modificar para dotarlo de sensores. Otra dificultad añadida fue la instalación de una unidad electrónica programable diferente a la empleada en el anterior proyecto. La posibilidad de cambio de combustible requirió de una circuitería de conmutación diseñada a tal efecto, y que permitió el cambio de gasolina a hidrógeno y viceversa al instante, incluso con carga, a voluntad del usuario. Se realizaron numerosos ensayos tanto con gasolina como con hidrógeno para ajustar el correcto funcionamiento del aparato. Para ello se aplicó un rango de cargas eléctricas para ajustar todos los puntos de operación del grupo electrógeno, tanto con gasolina como con hidrógeno, minimizando el consumo y optimizando su funcionamiento.

El tercer artículo tiene por título: *“Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline)”*. Mi contribución personal a este trabajo consistió en el diseño de la electrónica del motor así como en su instalación y programación, así como múltiples ensayos para optimizar el funcionamiento del motor en el vehículo. La mayor dificultad fue la incorporación de la unidad electrónica programable en el sistema electrónico existente en el vehículo. Esta se hizo en paralelo a la unidad electrónica de origen sin que ésta detectase un funcionamiento anómalo, de tal forma que todos los sistemas auxiliares funcionaran correctamente. En base al trabajo realizado anteriormente con el prototipo en el banco de motores, y a la filosofía del funcionamiento dual gasolina/hidrógeno utilizada en el grupo electrógeno se decidió que el funcionamiento dual gasolina/hidrógeno para el vehículo era muy interesante. El aspecto que más tiempo requirió fue el amplio programa de necesarios para ajustar el correcto funcionamiento del motor en diferentes condiciones. Se realizaron pruebas del

motor en banco fijo y posteriormente se efectuaron pruebas del vehículo, tanto en banco de rodillos como en circuito privado para evaluar sus prestaciones.

**2.2 Artículo I: “*Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline*”**

**Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor**



**2.3    Artículo II: “*Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit*”**

**Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor**

## **2.4 Artículo III: “*Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline)*”**

**Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor**

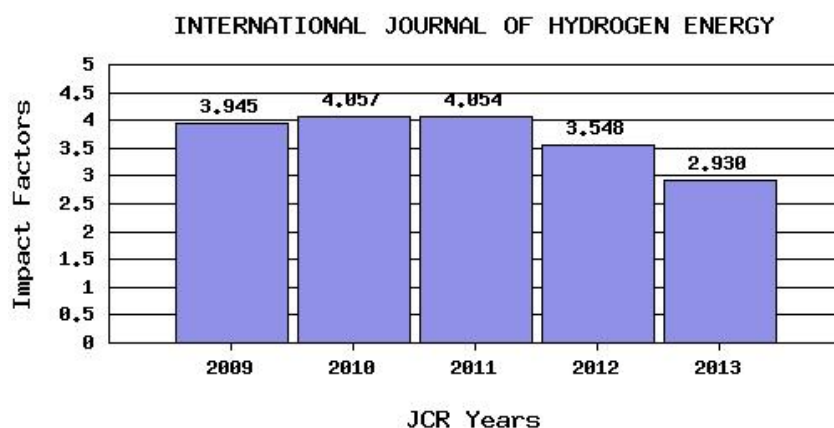
## 2.5 Indicadores de calidad

Los tres artículos presentados se han publicado en la revista *Intenational Journal of Hydrogen Energy*, cuya calidad como publicación se analiza a continuación.

Uno de los indicios de calidad de una revista científica se suele medir por el denominado factor de impacto, que viene dado por el cociente entre el número de veces que los artículos publicados en los dos últimos años son citados y el número de artículos publicados en la revista en ese mismo periodo. Como ejemplo, el cálculo del factor de impacto para 2012 se realizaría de la siguiente forma:

Journal Impact Factor ⓘ			
Cites in 2012 to items published in:		Number of items published in:	
2011 = 5084		2011 = 1753	
2010 = 6755		2010 = 1584	
Sum: 11839		Sum: 3337	
Calculation: <u>Cites to recent items</u>		<u>11839</u> = 3.548	
Number of recent items		3337	

En la siguiente figura se presenta la tendencia del factor de impacto de la revista durante los últimos 5 años de los que se disponen datos.



ARTÍCULO 1:

***“Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen:  
Performance comparison using hydrogen and gasoline”.***

Por: Sopena, C.; Diéguez, P. M.; Sáinz, D.; Urroz, J. C.; Guelbenzu, E.; Gandia, L. M.

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Volume: 35 Issue: 3  
Pages: 1420-1429 Published: FEB 2010

Factor de impacto (2010): 4,057. Posición 12/79, 1<sup>er</sup> cuartil de la categoría  
Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Factor de impacto (2011): 4,054. Posición 12/81, 1<sup>er</sup> cuartil de la categoría  
Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Factor de impacto (2012): 3,548. Posición 16/81, 1<sup>er</sup> cuartil de la categoría  
Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Factor de impacto (2013): 2,930. Posición 29/83, 2<sup>o</sup> cuartil de la categoría  
Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Número de veces citado: 22

## ARTÍCULO 2:

*“Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit”.*

Por: Sainz, D.; Dieguez, P. M.; Urroz, J. C. ; Sopena, C.; Guelbenzu, E.; Perez-Ezcurdia, A.; Benito-Amurrio, M.; Marcelino-Sadaba, S.; Arzamendi, G.; Gandia, L. M.

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Volume: 36 Issue: 21  
Pages: 13781-13792 Published: OCT 2011

Factor de impacto (2011): 4,054. Posición 12/81, 1<sup>er</sup> cuartil de la categoría Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Factor de impacto (2012): 3,548. Posición 16/81, 1<sup>er</sup> cuartil de la categoría Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Factor de impacto (2013): 2,930. Posición 29/83, 2<sup>o</sup> cuartil de la categoría Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Número de veces citado: 10

### ARTÍCULO 3:

*“Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline)”.*

Por: Sainz, D.; Dieguez, P. M.; Sopena, C.; Urroz, J. C.; Gandia, L. M.

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Volume: 37 Issue: 2

Pages: 1781-178 Published: JAN 2012

Factor de impacto (2012): 3,548. Posición 16/81, 1<sup>er</sup> cuartil de la categoría Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Factor de impacto (2013): 2,930. Posición 29/83, 2<sup>o</sup> cuartil de la categoría Energy&Fuels en el Journal Citation Report, JCR.

Número de veces citado: 4



### **3 RESUMEN DE LOS RESULTADOS**

#### **3.1 Introducción**

En este apartado se presentan los principales resultados y conclusiones obtenidos a lo largo de este trabajo. A continuación se realizará un análisis conjunto de los mismos y se extraerán conclusiones globales.

La primera parte corresponde al prototipo de motor de gasolina comercial convertido al funcionamiento con hidrógeno, y que ha posibilitado posteriores trabajos. La segunda parte se dedica a la conversión de un grupo electrógeno comercial de gasolina para su funcionamiento dual gasolina/hidrógeno, y es una adaptación de los conocimientos adquiridos en el prototipo inicial pero esta vez aplicados a un motor diferente, tanto por sus características como por la aplicación a la que está destinado. Finalmente se aborda la aplicación práctica de un motor idéntico al del primer prototipo inicial pero esta vez aplicado a un vehículo, y además con funcionamiento dual gasolina/hidrógeno.

#### **3.2 Adaptación de un motor de gasolina VW al funcionamiento con hidrógeno**

En este apartado se presenta la adaptación de un motor de combustión interna alternativo que funcionaba con gasolina a su funcionamiento con combustible gaseoso, en este caso hidrógeno. En concreto se trata de un motor VW con cilindrada de 1.4 litros y que desarrolla una potencia máxima de 59 kW. El trabajo desarrollado y los resultados y conclusiones extraídas dieron lugar a un artículo publicado en la revista *International*

*Journal of Hydrogen Energy* que tiene por título: “*Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline*”, que se incluye en el capítulo 2 de esta memoria.

Las principales modificaciones realizadas en el motor consisten en la adaptación del colector de admisión para incorporar un grupo de inyectores de hidrógeno. Se han mantenido todos los sensores de origen del motor y se ha utilizado una unidad electrónica programable o ECU (*Electronic Control Unit*) MoTeC M400, con la que se ha programado y calibrado todos los sensores y actuadores. También se ha incorporado un intercambiador de calor agua-aceite para evitar el sobrecalentamiento del aceite, y se ha eliminado el catalizador de tres vías del escape.

El dosado es una variable de operación muy importante en el funcionamiento de un motor. El dosado absoluto ( $F$ ) se define como la masa de combustible entre la masa de aire contenidas en la mezcla que entra al motor. El dosado estequiométrico ( $F_{st}$ ) es la relación entre la masa de combustible y la masa de aire mínimo necesario para que se produzca la combustión completa. El dosado relativo ( $F_r$ ) es la relación entre el dosado absoluto y el dosado estequiométrico, de tal forma que un dosado relativo  $F_r > 1$  sería una mezcla rica o con exceso de combustible, un dosado relativo  $F_r < 1$  sería una mezcla pobre o con defecto de combustible y un dosado relativo  $F_r = 1$  sería una mezcla para una combustión completa. Otra medida muy utilizada es el factor lambda ( $\lambda$ ), que se define como la relación aire-combustible de la mezcla con respecto a la relación estequiométrica, y es equivalente a la inversa del dosado relativo  $F_r$ . Como ejemplo, un valor de lambda  $\lambda = 2$  sería una mezcla pobre y equivaldría a una cantidad de aire del doble que la estequiométrica, y sería equivalente a un dosado relativo  $F_r = 1/\lambda = 0.5$ .

Se ha ensayado el motor a diferentes dosados de hidrógeno, haciendo numerosos de ensayos en todos los puntos de operación del motor para elaborar los diferentes mapas de inyección y encendido. Cada uno de estos puntos se ha optimizado para obtener la mayor potencia con el menor consumo. Estos ensayos han requerido gran cantidad de tiempo y de consumo de hidrógeno.

Los resultados sobre el funcionamiento del motor alimentado por hidrógeno (en adelante *H<sub>2</sub>ICE*, *Hydrogen Internal Combustion Engine*) se han evaluado en base a los valores de la presión media efectiva, potencia, consumo específico de combustible y emisiones contaminantes. Estos parámetros se han comparado con los proporcionados por el motor original alimentado por gasolina. También se han estimado las prestaciones que podría tener un vehículo movido por el *H<sub>2</sub>ICE*.

En la Figura 10 se muestran los valores de la presión media efectiva (*b MEP*, *brake mean effective pressure*) del motor funcionando a plena carga (*WOT*, *Wide Open Throttle*) con hidrógeno para diferentes dosados de combustible ( $\lambda$  o  $\lambda = 1,6, 2$  y  $2,5$ ) y se comparan con los valores del motor funcionando con gasolina. Los valores obtenidos con hidrógeno están dentro de los valores esperados, ya que los valores teóricos de presión media efectiva para el mismo rendimiento efectivo son 50, 42 y 35% respectivamente del valor obtenido con gasolina, y es debido a que entra al cilindro menor masa de combustible por la baja densidad del hidrógeno [18].

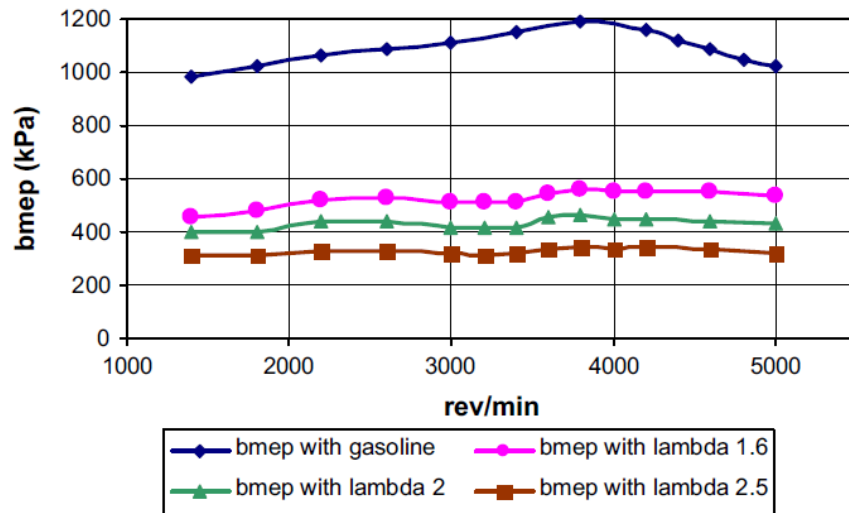


Fig. 10. Comparación de la presión media efectiva con gasolina y con hidrógeno a diferentes dosados y velocidad del motor.

En lo que respecta a la potencia en el eje del motor, se muestran los resultados en la Figura 11. La potencia máxima del motor (MBP o *Maximum Brake Power*) está limitada por el régimen máximo, que ha sido fijado en 5.000 rpm. La potencia máxima a plena carga (WOT) alcanzada con hidrógeno a  $\lambda=1.6$  llega a 32 kW, mientras que funcionando con gasolina alcanza 59 kW a 5.000 rpm.

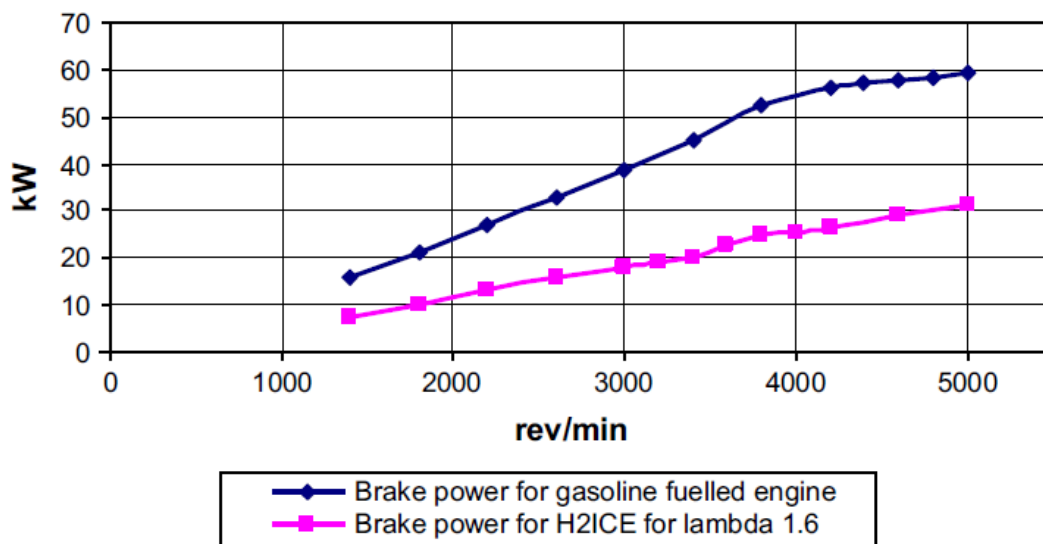


Fig. 11. Comparación de la potencia del motor alimentado con gasolina y con hidrógeno ( $\lambda = 1,6$ ).

Para comparar el consumo específico del motor funcionando con gasolina y con hidrógeno se utiliza el consumo específico equivalente de gasolina (*bsfceq, brake specific fuel consumption equivalent*). En la Figura 12 se compara el consumo específico del motor con hidrógeno a  $\lambda=1.6$ , 2 y 2.5 respectivamente, con el consumo específico equivalente de gasolina.

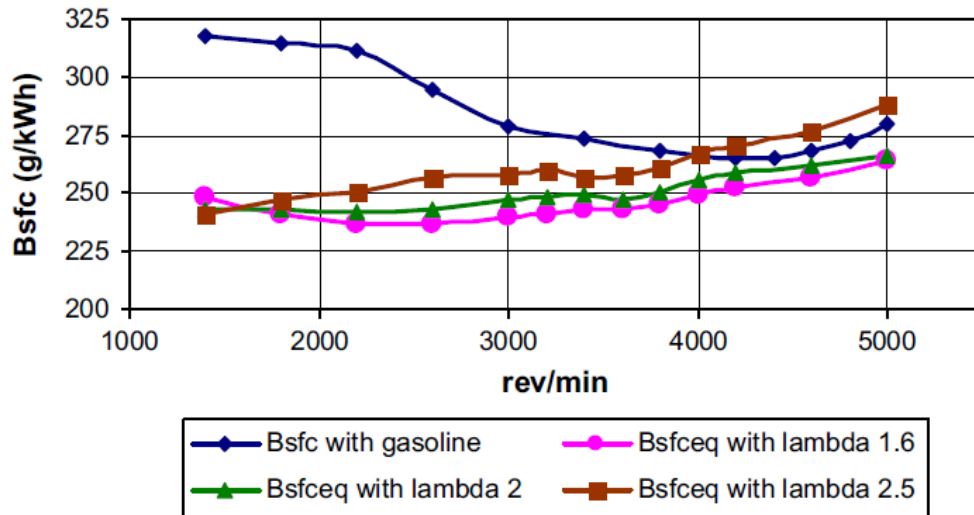


Fig. 12. Consumo específico con gasolina y su equivalente con hidrógeno a diferentes dosados.

El resultado muestra que el  $H_2ICE$  tiene un menor consumo específico y por lo tanto un mejor rendimiento efectivo que cuando se alimenta con gasolina, especialmente a regímenes bajos y medios. Este hecho se debe a que la combustión de hidrógeno es más rápida y cercana a la combustión a volumen constante, y por tanto, con un ciclo termodinámico más eficiente que la combustión de gasolina. Es un resultado a resaltar teniendo en cuenta que los valores de lambda utilizados con el motor  $H_2ICE$  son mayores que con gasolina, que funciona con mezcla estequiométrica ( $\lambda = 1$ ) o incluso ligeramente rica en combustible ( $\lambda < 1$ ). En el caso del  $H_2ICE$  no es posible trabajar con mezcla estequiométricas por el riesgo de que se produzcan anomalías en la combustión

que pongan en riesgo el funcionamiento del motor. Se observa que el consumo específico más bajo corresponde a la mezcla más rica considerada ( $\lambda = 1,6$ ), con la que se obtiene mejor rendimiento efectivo. La mezcla más pobre ( $\lambda = 2,5$ ) es la menos eficiente excepto a regímenes muy bajos, lo cual podría atribuirse a una menor eficiencia de mezclas muy pobres debido a la mayor proporción de inquemados y una combustión más lenta [19-21].

Se ha encontrado que las emisiones de CO e hidrocarburos inquemados (HC) del  $H_2ICE$  debidos a la combustión del aceite lubricante son extremadamente bajas. Las emisiones de contaminantes más importantes en el escape son los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). La emisión de hidrógeno sin quemar ha resultado despreciables para valores de  $\lambda < 3$ .

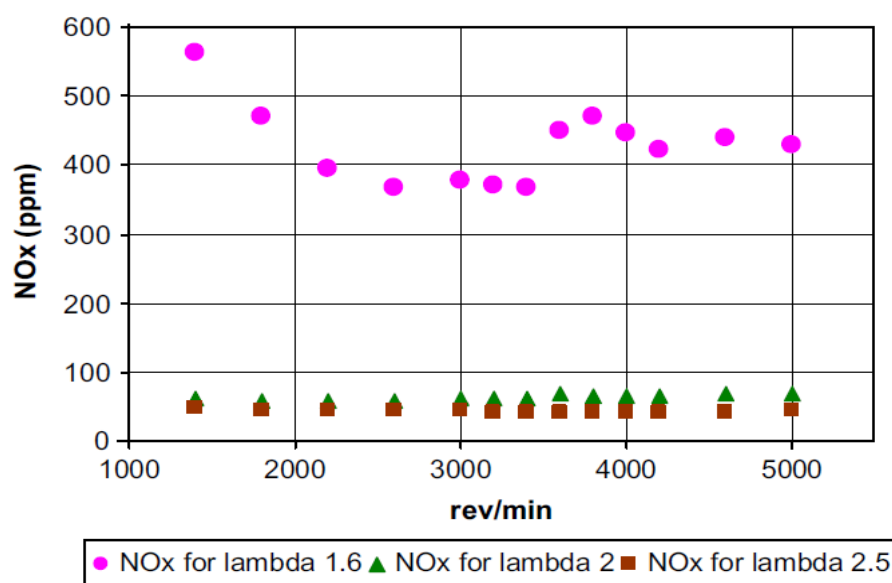


Fig. 13. Emisión de  $NO_x$  para el funcionamiento con hidrógeno a diferentes dosados.

La emisión de  $NO_x$  para valores de  $\lambda = 1,6$ , 2 y 2,5 a plena carga se han comparado en la Figura 13. Hay que aclarar que el catalizador de tres vías del motor original fue

eliminado ya que no puede trabajar en las condiciones en las que opera el motor con  $H_2$ . Además, las emisiones de  $NO_x$  para el motor alimentado por gasolina sin catalizador no están disponibles. Como se esperaba, las emisiones de  $NO_x$  se incrementan cuando la mezcla se hace más rica porque la máxima temperatura de combustión aumenta cuando el valor de  $\lambda$  disminuye. Se ha encontrado que para valores de  $\lambda$  por encima de 1,8 se producen valores de emisión de  $NO_x$  muy bajos del orden de 50-75 ppm. Para  $\lambda=1.6$  las emisiones de  $NO_x$  varían entre 350 y 550 ppm dependiendo del régimen del motor. Aunque estos valores son significativos están muy por debajo del rango de 100-2.500 ppm, típico para motores alimentados con gasolina [22]. No obstante, hay que remarcar que las máximas emisiones de  $NO_x$  para motores alimentados por hidrógeno, del orden de 10.000 ppm, se dan alrededor de  $\lambda = 1,3$ . Pese a la obtención de una menor potencia para motores  $H_2ICE$  se recomienda la operación con mezcla pobre a fin de minimizar las emisiones de  $NO_x$  [9,19,21].

Se ha encontrado también que las emisiones de  $NO_x$  son muy sensibles al avance al encendido, especialmente para mezclas relativamente ricas ( $\lambda < 2$ ). Pequeños cambios en el avance al encendido con respecto al valor óptimo del par motor máximo (MBT) originan grandes incrementos en la emisión de  $NO_x$ . Se han ajustado los avances al encendido para obtener un compromiso entre el par motor y las emisiones de  $NO_x$ . En las Figuras 14 y 15 se ilustra el efecto de la variación de  $5^\circ$  en el avance al encendido con respecto al avance óptimo en la emisión de  $NO_x$  para los valores de  $\lambda = 1,6$  y 2 respectivamente.

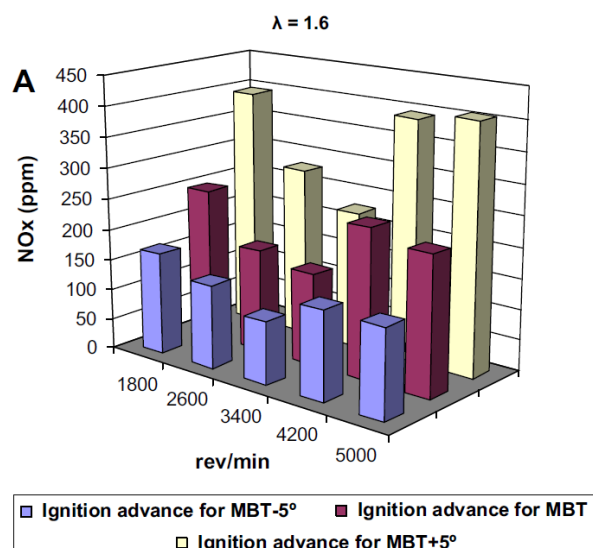


Fig. 14. Variación de las emisiones de NO<sub>x</sub> con respecto al avance óptimo ( $\lambda = 1,6$ ).

En la Figura 14 ( $\lambda = 1,6$ ) se observa que las emisiones de NO<sub>x</sub> prácticamente se doblan al incrementar en 5° el avance al encendido, sin variar sustancialmente el par motor. Al contrario, la presión media efectiva sufre una caída apreciable al disminuir en 5° el avance al encendido. Cuando la mezcla se hace más pobre, la influencia del avance al encendido en la emisión de NO<sub>x</sub> disminuye. Se observa claramente en la Figura 15 ( $\lambda = 2$ ), que la emisión de NO<sub>x</sub> sólo cambia para regímenes por encima de 3.400 rpm. En cualquier caso, las concentraciones de NO<sub>x</sub> son bajas, por debajo de 70 ppm. Al contrario, el efecto negativo de reducir el avance al encendido en la presión media efectiva se mantiene en condiciones de dosado más pobres.



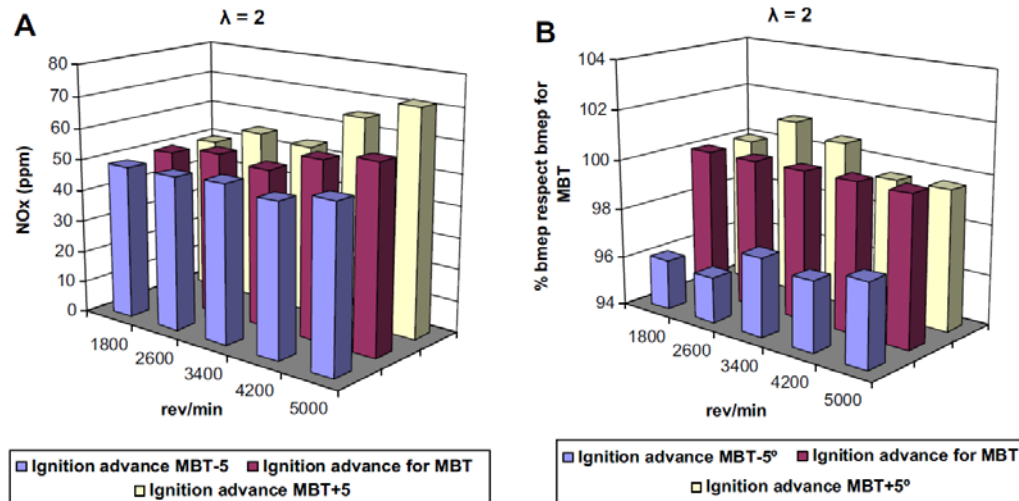


Fig. 15. Variación del NOx y del par motor con respecto al avance óptimo ( $\lambda = 2$ ).

La Figura 16 muestra la comparación entre la potencia requerida para mover el vehículo y la potencia desarrollada por el motor funcionando con hidrógeno y  $\lambda = 1,6$  y un ratio 1.0 de la caja de cambios [23,24]. Se observa que el motor desarrolla suficiente potencia para llevar al vehículo hasta una velocidad máxima de alrededor de 140 km/h. Esta velocidad es apropiada para la conducción segura de un vehículo de estas características. Por otra parte, hay reserva suficiente de potencia para mover el vehículo en una ruta urbana, ya que el límite de velocidad suele ser de 50 km/h. Para el caso de vías con pendientes de 5 y 10% y usando la caja de cambios original, que no ha sido diseñada para el  $H_2ICE$ , el vehículo podría alcanzar velocidades máximas de 105 km/h (3ª marcha) y 70 km/h (2ª marcha), respectivamente.

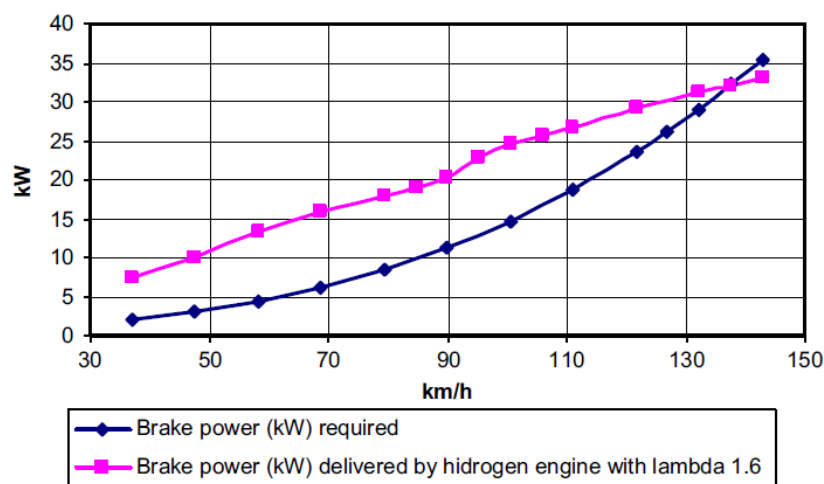


Fig. 16. Potencia requerida por el vehículo y potencia entregada por el motor ( $\lambda = 1,6$ ).

Las modificaciones para la conversión de un motor de gasolina a su funcionamiento con hidrógeno son básicamente la modificación del colector de admisión para incorporar los inyectores de hidrógeno, un acumulador de baja presión de hidrógeno, junto con una unidad electrónica programable.

Se ha logrado de forma satisfactoria realizar la conversión a hidrógeno de un motor que funcionaba originalmente con gasolina. El motor funcionando con hidrógeno desarrolla algo más de la mitad de potencia que desarrolla con gasolina, sin embargo sería suficiente para llevar a un vehículo una velocidad de unos 140 km/h en llano. Esta potencia es más que suficiente para mover un vehículo en una ruta urbana con pendientes de hasta un 10%.

El motor es susceptible de mejoras como puede ser el aumento de potencia mediante sobrealimentación o por cilindrada. También, debido al gran margen de inflamabilidad del hidrógeno, se podría utilizar un control de tipo diésel *Wide Open Throttle (WOT)* con mariposa completamente abierta y variando el dosado con la carga del motor, aumentando así el rendimiento del motor a bajas cargas. También sería interesante el

estudio más en profundidad de la generación de  $\text{NO}_x$  y el estudio de la detonación en la combustión del hidrógeno, así como estrategias para minimizar o prevenir estos fenómenos.

### 3.3 Adaptación de un grupo electrógeno al funcionamiento con hidrógeno

En este apartado se presenta la conversión de un grupo electrógeno comercial de gasolina para su funcionamiento dual (gasolina/hidrógeno). Este trabajo dio lugar a un artículo publicado en la revista *International Journal of Hydrogen Energy* que tiene por título: “*Conversion of a gasoline engine-generator set to a bi-fuel (hydrogen/gasoline) electronic fuel-injected power unit*”, que se incluye en el capítulo 2 de esta memoria.

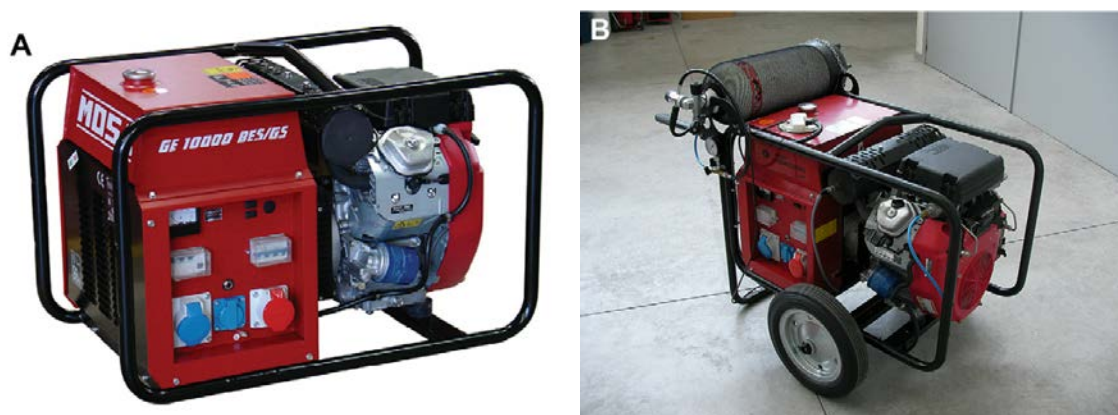
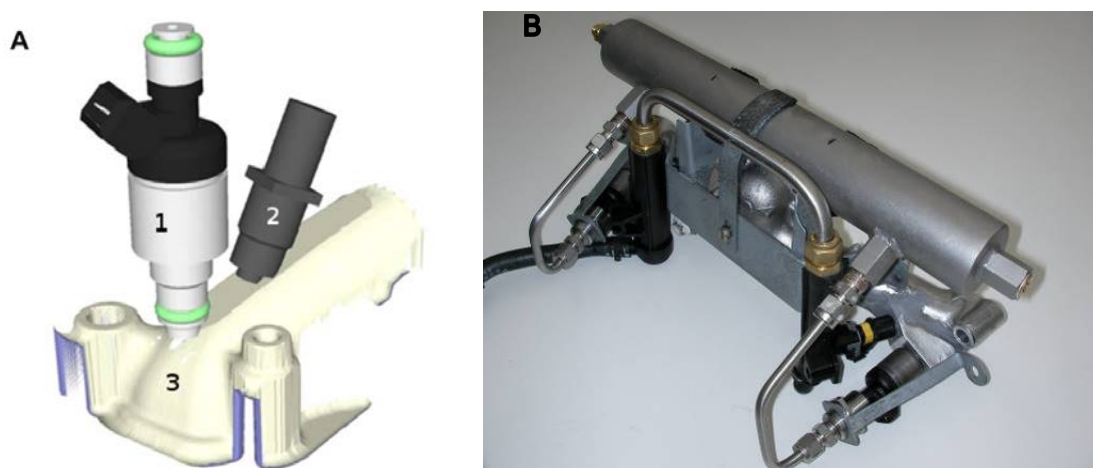


Fig. 17. Grupo electrógeno de gasolina original (A) y tras la conversión a funcionamiento dual (B).

El motor utilizado en el grupo electrógeno es un Honda GX-620, un motor de cuatro tiempos de  $614 \text{ cm}^3$  refrigerado por aire y con una configuración en “V” a  $90^\circ$  (Figura 17). La alimentación original era por carburador y el encendido por magneto transistorizado. Los principales cambios para la modificación del motor consistieron en la incorporación de un sistema de inyección secuencial de hidrógeno y otro de gasolina,

un sistema secuencial de encendido, y todos los sensores electrónicos necesarios. Además hubo que realizar el nuevo cableado electrónico con la ECU programable y el resto de subsistemas.

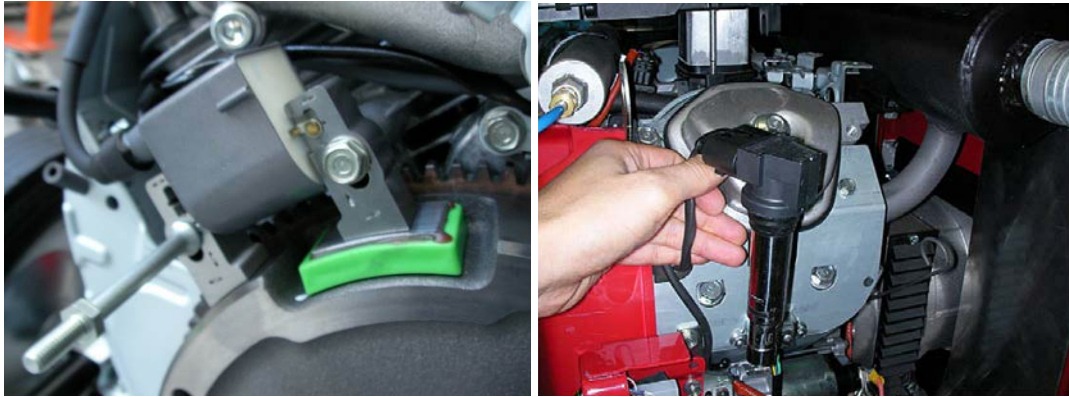
Las modificaciones en el sistema de alimentación de combustible se observan en la Figura 18. Los inyectores tanto de gasolina como de hidrógeno se han ubicado al final del colector de admisión, orientados hacia la válvula de admisión del cilindro (Figura 18 A). El montaje de los acumuladores e inyectores de gasolina e hidrógeno sobre el colector de admisión se muestran en la Figura 18 B.



*Fig. 18. A: Orientación de los inyectores de hidrógeno (1) y gasolina (2) en el colector de admisión (3). B: Montaje del sistema de alimentación de gasolina e hidrógeno.*

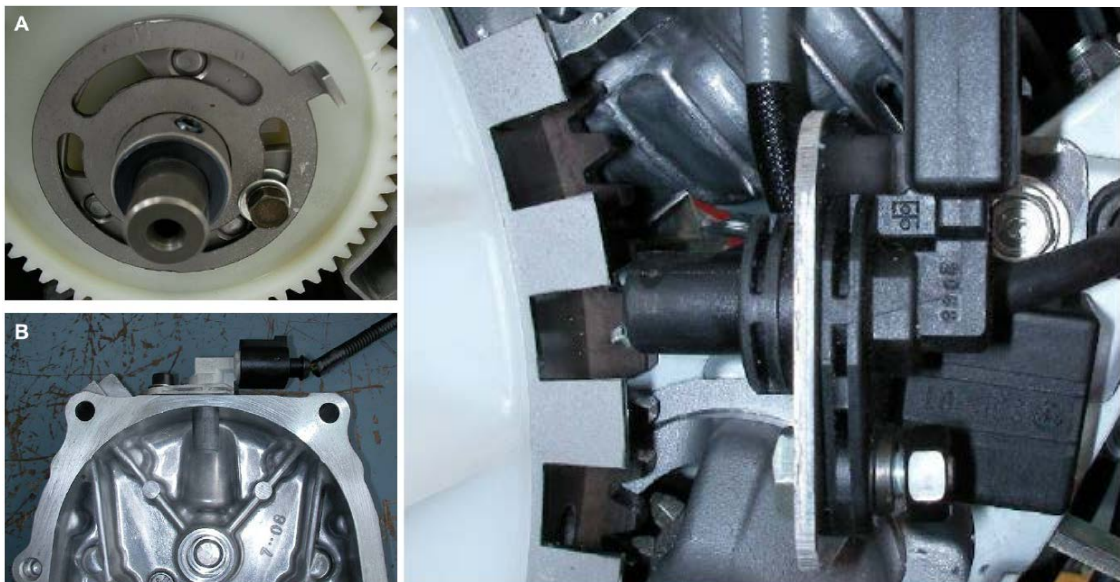
Para completar el sistema de alimentación se instaló una bomba de gasolina en el depósito y un regulador de presión para la alimentación de hidrógeno. El motor original accionaba el encendido de las bujías mediante magnetos transistorizados (Figura 19 A) accionados por el volante de inercia, produciendo dos chispas por ciclo (“chispa perdida”). El salto de la “chispa perdida” puede llevar a combustiones anormales con hidrógeno, por lo que el magneto de cada cilindro fue sustituido por una bobina electrónica. La bobina electrónica (Figura 19 B) que se monta directamente sobre la

bujía, permite el encendido secuencial haciendo saltar la chispa sólo cuando corresponde, a la vez que ahorra interferencias al no tener cable de alta tensión.



*Fig. 19. Magneto transistorizado de origen (izquierda) y una de las bobinas electrónicas instaladas (derecha).*

Para el funcionamiento del motor fue necesario instalar los sensores básicos de sincronización: sensor de cigüeñal y sensor de levas, tal y como se muestra en la Figura 20. Estos sensores permiten establecer la posición exacta del pistón en el ciclo en el que se encuentra, de esta forma se consigue un funcionamiento completamente secuencial: cada inyector y bujía actúan en el momento adecuado.



*Fig. 20. Disco dentado y sensor del árbol de levas (izquierda), sensor y disco dentado del cigüeñal (derecha).*



Los sensores utilizados de efecto Hall proporcionan una señal digital con lo que se evitan mejor las interferencias y se gana en precisión con respecto a los sensores inductivos. Además, se instaló un sensor de posición de mariposa para medir el grado de carga del motor, un sensor de temperatura del aceite del cárter, y un sensor de oxígeno (o sonda lambda) en los gases de escape para medir el dosado de combustible (Figura 21).



*Fig. 21. Sensor de posición de mariposa en el carburador anulado (izquierda) y sensor de oxígeno en el escape (derecha).*

Una vez instalados los sensores se elaboró el cableado eléctrico de todos los sensores y actuadores y se instaló la unidad electrónica *DTA Fast S60*, tal y como muestra el esquema de la instalación de la Figura 22.

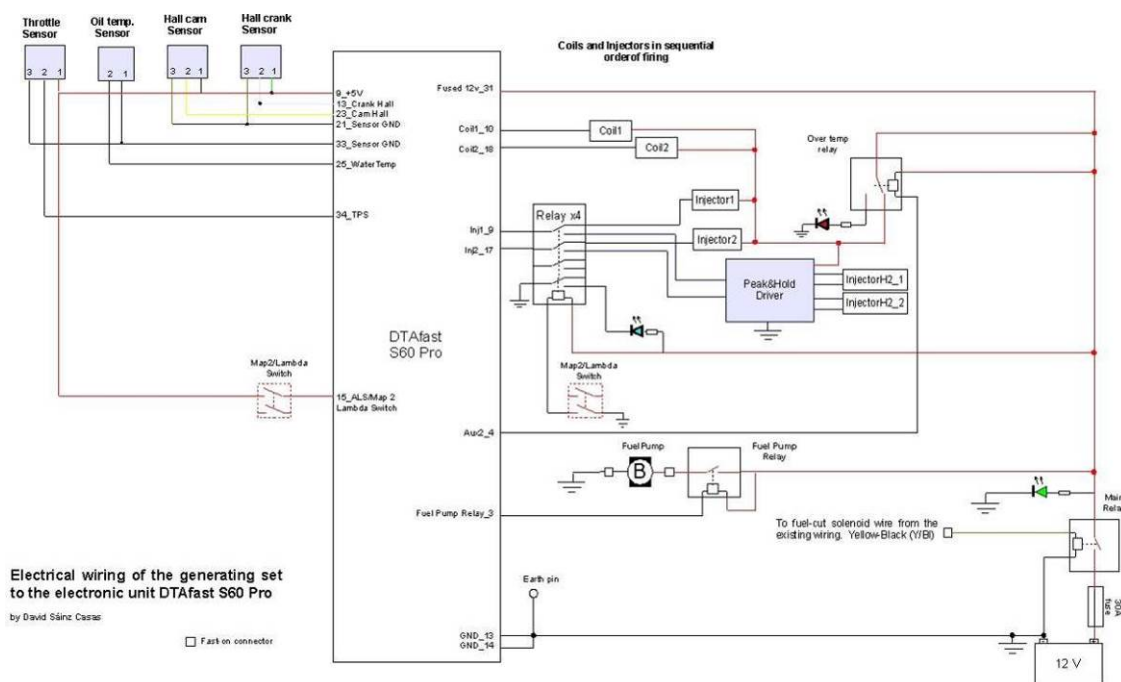


Fig. 22. Esquema eléctrico de todos los elementos eléctricos del grupo electrógeno.

En la Figura 23 se observan todos los elementos eléctricos: unidad electrónica, driver de inyectores de hidrógeno, sensores, inyectores, bobinas, relés, instalados en la carcasa del grupo y el cableado que los une a todos.



Fig. 23. Driver de inyectores de hidrógeno (izquierda) y unidad electrónica ECU (centro).

El trabajo más concienzudo fue la calibración de los sensores y la configuración de los parámetros de la unidad electrónica. Hubo que sincronizar la señal de cigüeñal y la

de levas y referir el punto muerto superior de forma precisa, para posteriormente calibrar sensores y por último configurar correctamente los actuadores.

Después fue necesario ensayar el grupo electrógeno en diferentes condiciones de carga con gasolina e hidrógeno, ajustar la inyección y el encendido para obtener un consumo, rendimiento y emisiones óptimas. Los ensayos se realizaron con cargas eléctricas resistivas de 1 a 5 kVA en escalones de 1 kVA, y hasta 8 kVA para gasolina. Estos ensayos requirieron bastante tiempo y combustible.

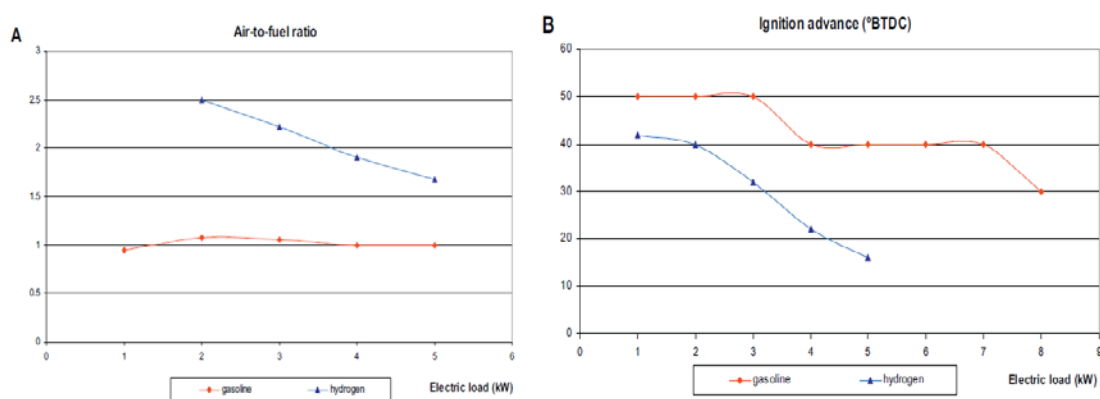


Fig. 24. Valor de lambda ( $\lambda$ ) utilizado (A) y avance al encendido (B) en función de la carga eléctrica.

En la Figura 24 A se observa la diferencia en el valor de lambda estequiométrico ( $\lambda = 1$ ) para gasolina, mientras que para hidrógeno requiere dosados más pobres ( $\lambda > 1$ ) para evitar problemas de anomalías en la combustión, detonación y altas emisiones de  $\text{NO}_x$  [9, 10]. Asimismo, se observa en la Figura 24 B, los valores del avance al encendido generalmente más bajos en el caso del hidrógeno, debido a la mayor velocidad de llama del hidrógeno.

En cuanto a las prestaciones del grupo electrógeno, se consiguió obtener una potencia de 5 kVA para hidrógeno y de 8 kVA para gasolina. Según se aprecia en la



Figura 25 A el consumo específico equivalente en el caso del hidrógeno es un 34% menor a 1 kVA y un 24% menor a 5 kVA.

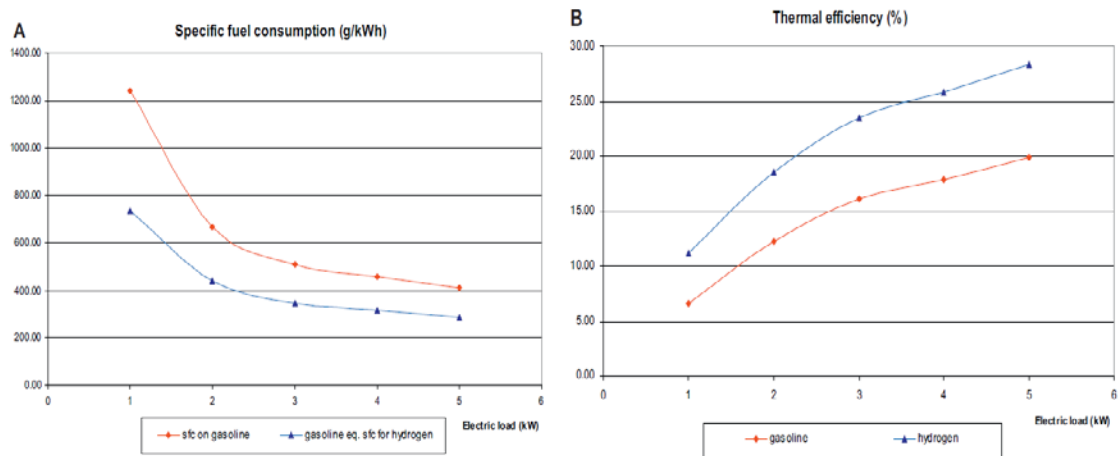


Fig. 25. Consumo específico de combustible(A) y rendimiento efectivo (B) para gasolina e hidrógeno.

La comparación entre el consumo de ambos combustibles se realiza teniendo en cuenta sus diferentes poderes caloríficos. En este caso se compara el consumo específico de gasolina con el consumo específico equivalente a la gasolina para el hidrógeno. A su vez, como muestra la Figura 25 B, el menor consumo específico con hidrógeno equivale a un mayor rendimiento efectivo del grupo electrógeno, ya que son magnitudes inversamente proporcionales.

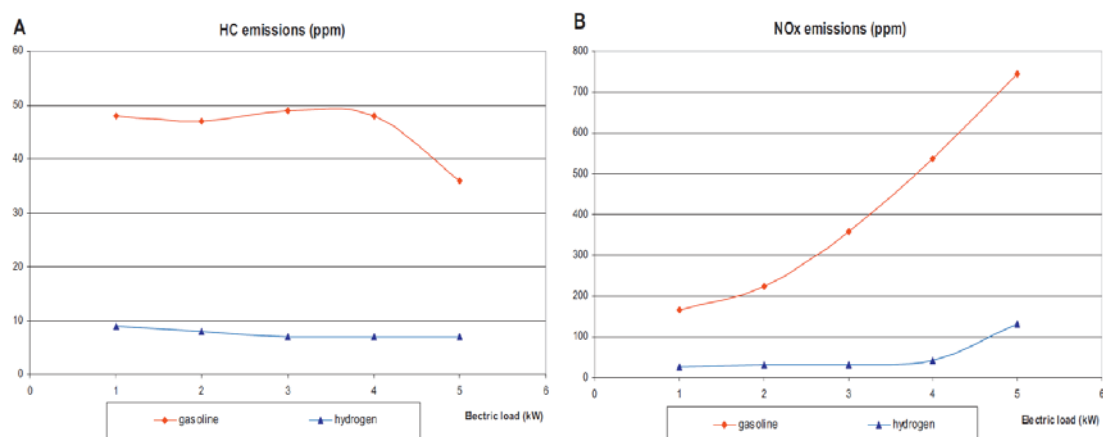


Fig. 26. Emisiones de hidrocarburos (A) y de NO<sub>x</sub> (B) para gasolina (rojo) e hidrógeno (azul).

Si se observa la Figura 26, la emisión de hidrocarburos inquemados con gasolina es baja y con hidrógeno mucho menor, obviamente. En el caso de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , para la gasolina son mayores a las de hidrógeno independientemente de la potencia eléctrica aplicada, siendo las emisiones para hidrógeno de 5 a 7 veces menor. Se constata que las emisiones de  $\text{NO}_x$  son muy bajas, por debajo de 30 ppm, para potencias de 1 a 4 kVA, mientras que para una carga de 5 kVA las emisiones aumentan hasta los 125 ppm.

Es bien sabido que las emisiones de  $\text{NO}_x$  están relacionadas con la temperatura de combustión, la cual aumenta conforme la mezcla se hace más rica en combustible ( $\lambda$  disminuye), favoreciendo la formación de  $\text{NO}_x$ . Las emisiones de  $\text{NO}_x$  para mezclas pobres de hidrógeno y aire dependen principalmente de las temperaturas alcanzadas en el cilindro; la emisión de  $\text{NO}_x$  es pequeña por encima de  $\lambda = 2$ , mientras que para valores menores (dosados más ricos) la emisión aumenta de forma exponencial, como se ve en la Figura 27 A. Las emisiones de  $\text{NO}_x$  también se ven afectadas por el avance al encendido utilizado, de tal forma que cuanto mayor es el avance al encendido mayor es la emisión de  $\text{NO}_x$  para un valor de  $\lambda$  dado. Esta influencia se da con mayor intensidad cuanto más rica es la mezcla de combustible, tal y como se ve en la Figura 27 B. Esta influencia se estudió también en el caso del prototipo de motor en banco de ensayo.

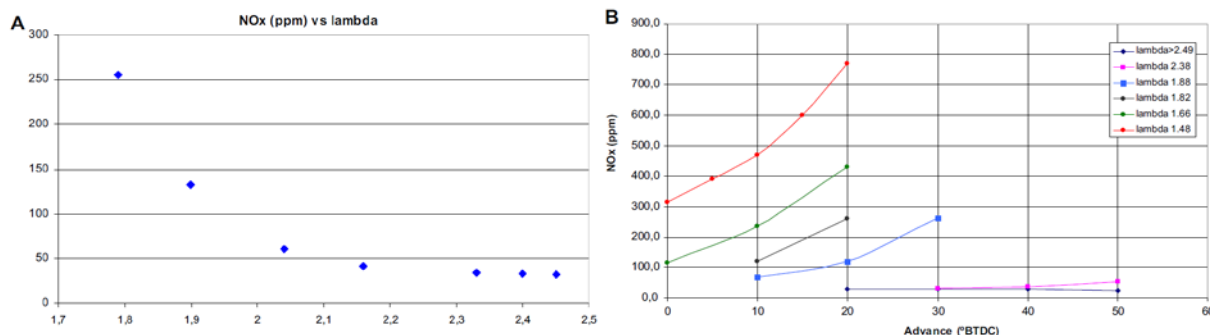


Fig. 27. Emisiones de hidrocarburos (A) y de NOx (B) para gasolina (rojo) e hidrógeno (verde).

Se ha logrado satisfactoriamente la conversión del grupo electrógeno comercial para funcionar indistintamente con gasolina o hidrógeno y de forma relativamente fácil y barata. El funcionamiento con hidrógeno se ve limitado en potencia a 5 kVA (para mayor potencia se podría utilizar la gasolina o gas natural) pero con emisiones contaminantes mucho menores que con gasolina y con un consumo específico un 24-34% menor. Esta aplicación tiene potencial para la implantación del hidrógeno para uso energético, especialmente en aplicaciones estacionarias donde el volumen de almacenamiento del hidrógeno no sea un problema.

### 3.4 Adaptación de un VW Polo a su funcionamiento dual gasolina/hidrógeno

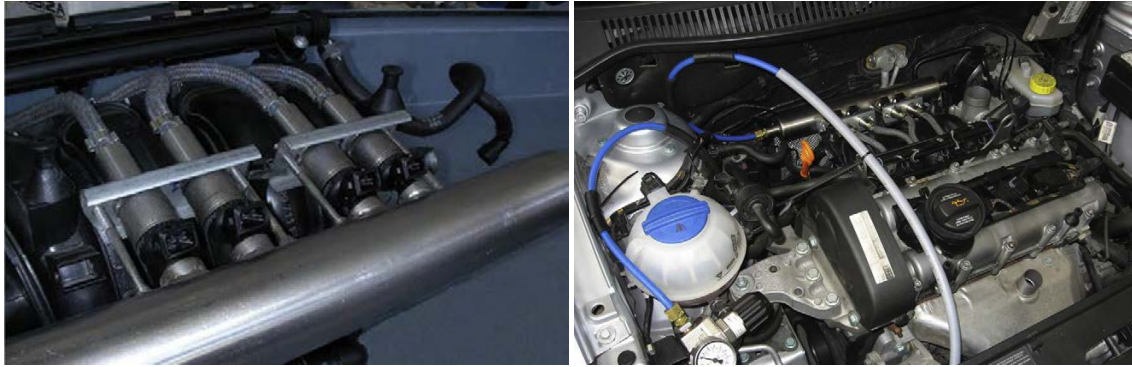
En este apartado se presenta la conversión de un vehículo VW Polo (Figura 28) con un motor de gasolina de 1.4 litros para su funcionamiento dual (gasolina/hidrógeno). El motor presente en este vehículo es muy similar al que se utilizó en el banco de ensayos para su conversión a hidrógeno, y en el cual se realizaron múltiples ensayos y estudios. Este trabajo dio lugar a un artículo publicado en la revista *International Journal of*

*Hydrogen Energy* que tiene por título: “*Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline)*”, que se incluye en el capítulo 2 de esta memoria.



Fig. 28. Vehículo Volkswagen Polo modificado para su funcionamiento dual (gasolina/hidrógeno).

Para conseguir el funcionamiento dual se modificó la admisión para incorporar el sistema de inyección de hidrógeno, manteniendo el sistema de inyección original de gasolina. El sistema de inyección de hidrógeno consiste en un acumulador junto con cuatro inyectores de hidrógeno, unidos al colector mediante mangueras flexibles. El suministro de hidrógeno se mantiene a una presión de 3 bar mediante un regulador de presión. Los elementos de suministro de hidrógeno: el acumulador y los inyectores de hidrógeno montados sobre el colector de admisión, como el conjunto instalado en el vano motor se pueden observar en la Figura 29.



*Fig. 29. Acumulador e inyectores de hidrógeno (izquierda) y alimentación de hidrógeno en vano motor (derecha).*

El hidrógeno se almacena en 2 botellas de 18 litros a 200 bar de presión, que contienen 500 g de hidrógeno, y se encuentran ubicadas en el maletero, tal y como se muestra en la Figura 30.



*Fig. 30. Botellas de hidrógeno instaladas en el maletero del vehículo.*

El funcionamiento dual gasolina/hidrógeno se consigue manteniendo el funcionamiento original del vehículo con gasolina con su unidad electrónica original, e incorporando una unidad electrónica programable para el funcionamiento con hidrógeno. La transición entre combustibles se realiza en la caja de conexiones, ubicada en el vano motor, cerca de ambas unidades electrónicas, tal y como se puede observar en la Figura 31.



Fig. 31. Vista del vano motor donde se ven las unidades electrónicas y la caja de conexiones.

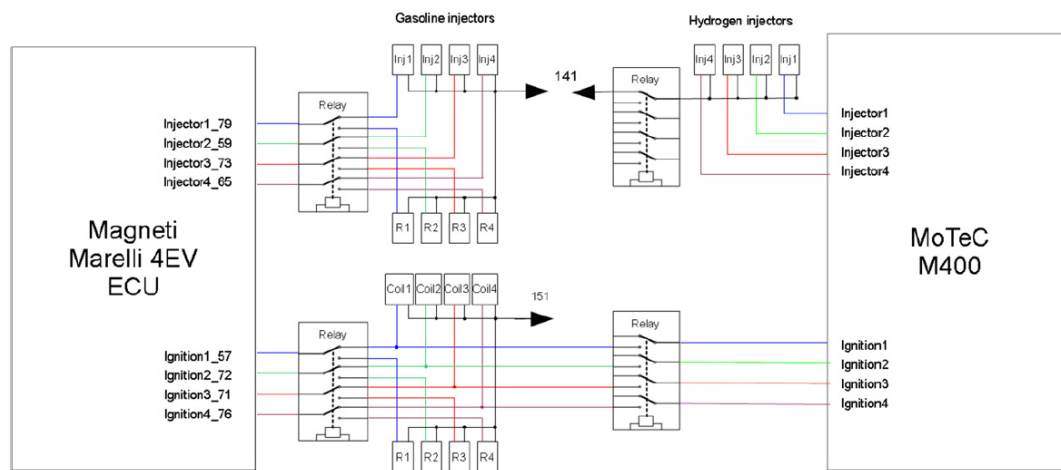


Fig. 32. Esquema eléctrico de la caja de conexiones del vehículo.

La unidad electrónica original es necesaria para el correcto funcionamiento de los elementos auxiliares del vehículo, por lo que la unidad electrónica programable para el hidrógeno ha de pasar desapercibida. Este requisito se consigue simulando los inyectores y bobinas mediante resistencias cuando el motor funciona con hidrógeno. El funcionamiento básico de este sistema de conmutación se puede observar en el esquema de la Figura 32.

El motor obtiene hasta 55 kW de potencia máxima cuando funciona con gasolina. Si se observa la Figura 33, el motor funcionando con hidrógeno desarrolla una menor



potencia, debido al uso de combustible gaseoso y a los dosados pobres, hasta un máximo de 30 kW para  $\lambda = 1,6$ .

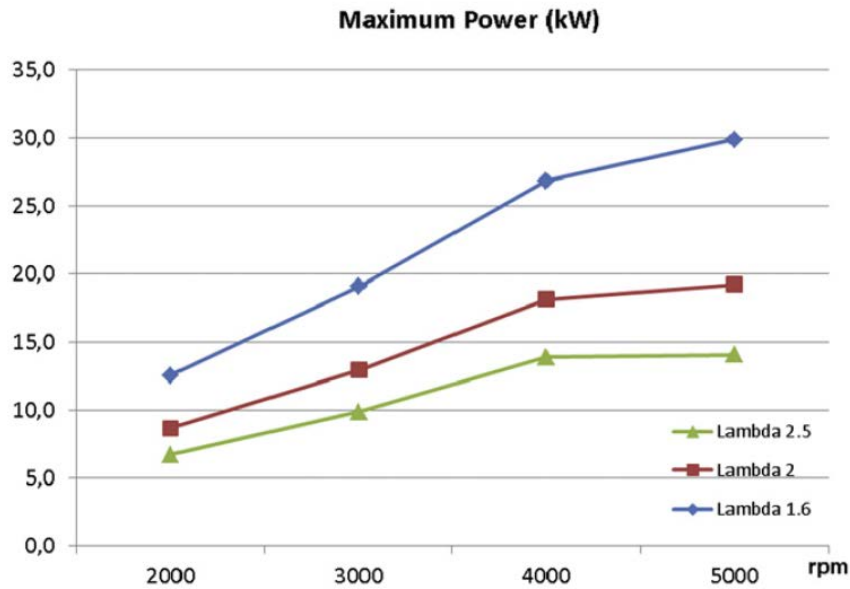


Fig. 33. Potencia máxima del motor funcionando con hidrógeno a diferentes dosados.

Las prestaciones del vehículo se probaron en circuito privado pero para obtener datos comparativos se evaluaron en un banco de rodillos. La Figura 34 muestra los gráficos potencia-velocidad del vehículo en las marchas 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> y 5<sup>a</sup> para el modo de funcionamiento con gasolina e hidrógeno.

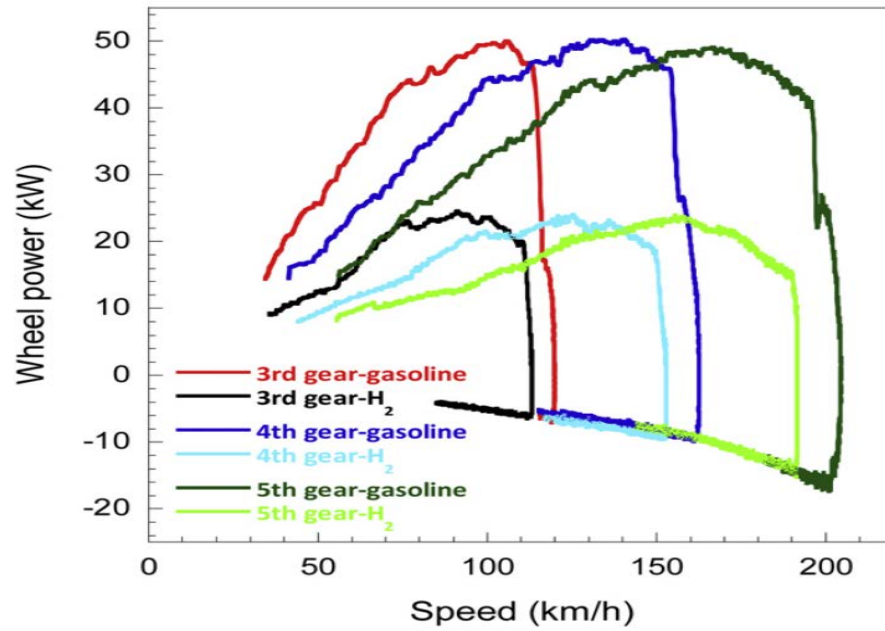


Fig. 34. Potencia máxima del motor funcionando con hidrógeno a diferentes dosados.

En la Figura 35 se observa la gráfica de aceleración (velocidad-tiempo) en las marchas 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> y 5<sup>a</sup> en gasolina e hidrógeno, donde la mayor potencia en gasolina redunda en una mayor aceleración que en el caso del hidrógeno.

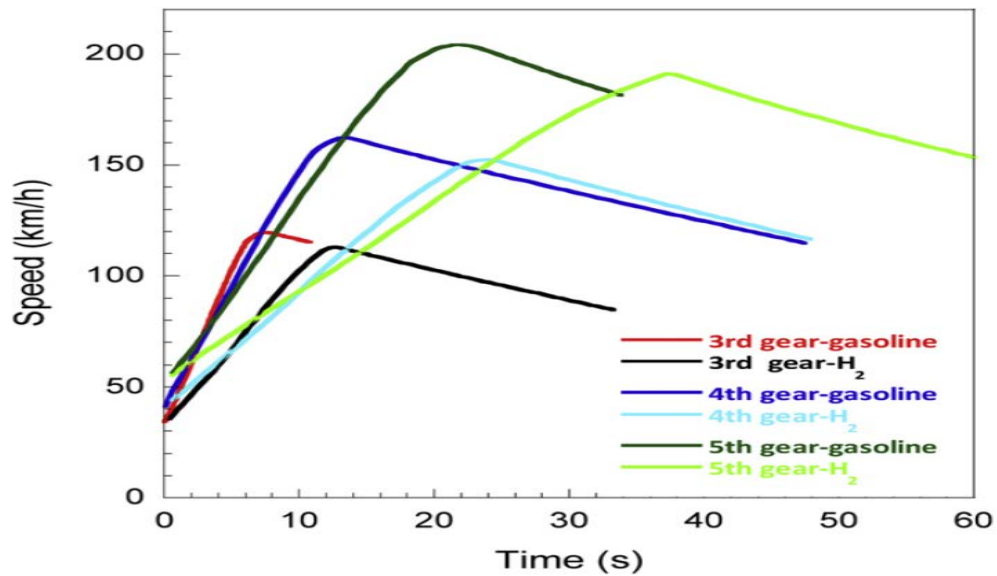


Fig. 35. Comparación en la aceleración con diferentes marchas entre gasolina e hidrógeno.



Con respecto a la emisión de gases contaminantes, las únicas emisiones relevantes de un motor  $H_2ICE$  son los óxidos de nitrógeno  $NO_x$ . La emisión de  $NO_x$  en el motor depende principalmente del valor del dosado empleado. Para dosados pobres con  $\lambda > 2$  se emiten alrededor de 40 ppm de  $NO_x$ , mientras que para mezclas más ricas las emisiones crecen rápidamente debido a las mayores temperaturas de combustión alcanzadas [10], así para un  $\lambda = 1,6$  se obtienen unas emisiones de entre 110 y 160 ppm. Para realizar una comparación de las emisiones de  $NO_x$  con los límites en la regulación europea se han obtenido los datos de emisión a 1800 rpm emitidos para la distancia equivalente a un km. Estos resultados son orientativos ya que no tenemos posibilidad de realizar el ciclo normalizado requerido en el procedimiento oficial.

En la Figura 36 se expone la emisión de  $NO_x$  para el motor de hidrógeno para diferentes valores de  $\lambda$  y la estimación de emisión en mg/km obtenidos.

<b>Table 1 – <math>NO_x</math> emitted by the bi-fuel engine running on hydrogen.</b>			
$\lambda$	Throttle (%)	$NO_x$ (ppm)	$NO_x$ (mg/km)
1.6	30	113	56
1.6	100	213	105
2.5	30	38	31
2.5	100	40	32

Fig. 36. Emisión de  $NO_x$  y estimación de los  $NO_x$  emitidos por kilómetro en diferentes condiciones.

Si comparamos estos valores con los establecidos en las normas Euro 5 y 6 las emisiones de  $NO_x$  están entre 60 y 82 mg/km [25]. Se observa que las emisiones del vehículo son razonablemente bajas y solamente a plena carga y máxima potencia se sobrepasan estos valores. Este hecho no debiera ser un gran problema ya que las

emisiones podrían ser tratadas posteriormente mediante catalizadores en el escape [26].

Por tanto, se ha conseguido realizar la conversión del vehículo a un funcionamiento dual gasolina/hidrógeno, y se ha logrado un funcionamiento satisfactorio en carretera. La transición de un combustible a otro se realiza a voluntad de forma casi imperceptible para el conductor incluso con el vehículo en movimiento, lo cual sería interesante para el cambio automático a gasolina cuando se agotase el hidrógeno a bordo, o cuando fueran necesarias potencias mayores en determinadas maniobras o regímenes de circulación.

Como conclusiones, se constata que la conversión de este vehículo es relativamente barata y fácilmente realizable. La posibilidad de funcionamiento dual gasolina/hidrógeno se hace una alternativa interesante, ya que permitiría la utilización de hidrógeno en recorridos urbanos, reduciendo las emisiones contaminantes, y la utilización de gasolina en trayectos interurbanos, abordando así la reducida autonomía con hidrógeno. Si la conversión se realizara en vehículos de serie se conseguiría reducir mucho los costes, ya que se podrían manejar los dos grupos de inyectores con una sola ECU, aunque habría que abordar la situación del depósito de hidrógeno fuera del habitáculo de pasajero, según la normativa europea.

Aquí también tomaría relevancia la investigación en torno a la acumulación de mayor cantidad de hidrógeno en depósitos de materiales compuestos a alta presión o en hidruros metálicos a baja presión.

### 3.5 Conclusiones generales

La tecnología de motores de combustión tiene más de un siglo de antigüedad, durante el cual ha ido evolucionando tecnológicamente, y ha demostrado un alto grado de fiabilidad.

El prototipo de  $H_2ICE$  desarrollado en el banco de motores y el equipamiento de la propia celda de motores empleados en esta tesis se han ido desarrollando progresivamente y han servido para comprender mejor la combustión del hidrógeno, desarrollando mapas para diferentes dosados de hidrógeno y ha sido la base para el desarrollo de posteriores proyectos de motores de hidrógeno. Actualmente tiene también una función educativa ya que permite la realización de prácticas de motores para los estudiantes de ingeniería.

El prototipo funcional de vehículo dual (hidrógeno/gasolina) fue desarrollado en base a un VW Polo 1.4 donado por VW Navarra. En aplicaciones de automoción, la posibilidad de funcionamiento dual (hidrógeno/gasolina) permitiría a un vehículo funcionar con hidrógeno en recorridos urbanos, reduciendo así la contaminación. Para rutas interurbanas y mayores distancias se podría hacer uso de la gasolina gracias a su mayor potencia y autonomía. Esta tecnología sería aplicable de forma inmediata y a un coste razonable, mientras se va desarrollando el vehículo de pila de combustible, y podría ayudar al despliegue de la infraestructura del hidrógeno.

El prototipo de grupo electrógeno dual (hidrógeno/gasolina) se desarrolló satisfactoriamente gracias a la financiación de *Acciona Biocombustibles*. La aplicación energética de los  $H_2ICE$  es quizás más interesante que la de automoción, ya que para

aplicaciones estacionarias el volumen de almacenamiento de hidrógeno no es un problema tan serio. Frente a los problemas de durabilidad de las pilas de combustibles, los motores de combustión interna alternativa han demostrado su fiabilidad en la generación eléctrica. Los  $H_2ICE$  podrían ser un gran aliado de las energías renovables discontinuas como la eólica y la solar, en el sentido de utilizar los excedentes para la producción de hidrógeno, para poder reconvertir en energía eléctrica en momentos de mayor demanda. Esto permitiría aumentar la potencia instalada en parques fotovoltaicos y eólicos.

Se ha constatado que la conversión de motores de encendido provocado para su funcionamiento con hidrógeno es factible, y relativamente sencilla y barata. La tecnología de motores de combustión basadas en hidrógeno se puede aplicar tanto para usos energéticos como de automoción.

Los motores de inyección indirecta de hidrógeno, debido a su baja densidad y la necesidad de utilizar dosados relativamente pobres, hacen que en la práctica la potencia máxima del motor se vea limitada. Este hecho hace que para obtener la misma potencia que con un motor de gasolina, un motor de hidrógeno de inyección indirecta necesite una mayor cilindrada. En la actualidad se están desarrollando prototipos de inyección directa de hidrógeno que solventan esta limitación de potencia e incluso superan la potencia de la gasolina con la misma cilindrada.

Sin duda la mayor limitación para el empleo del hidrógeno, especialmente en el caso de automoción, es el almacenamiento. La tecnología de almacenamiento avanza en la dirección de elevar la presión de almacenamiento con materiales compuestos ligeros,

además del almacenamiento sólido en hidruros metálicos, pero todavía palidecen comparados con la densidad energética de los combustibles fósiles.

El prototipo de vehículo dual (hidrógeno/gasolina) fue en su momento y sigue siendo el vehículo de hidrógeno de mayor potencia en España, y fue citado en un artículo de Sebastian Verhelst, una de las mayores autoridades en el empleo de hidrógeno en motores de combustión [10].

### 3.6 Líneas de futuro

Como líneas de futuro dentro del Grupo Hidrógeno de la Universidad Pública de Navarra se plantean dos líneas de investigación, la primera es el estudio de las anomalías de la combustión en el motor de hidrógeno, mientras que la segunda se trata del aumento de potencia del motor de hidrógeno.

Para la línea del estudio de anomalías de la combustión, en concreto de la detonación en el motor de hidrógeno, se está trabajando en acústica y vibraciones (Figura 37).

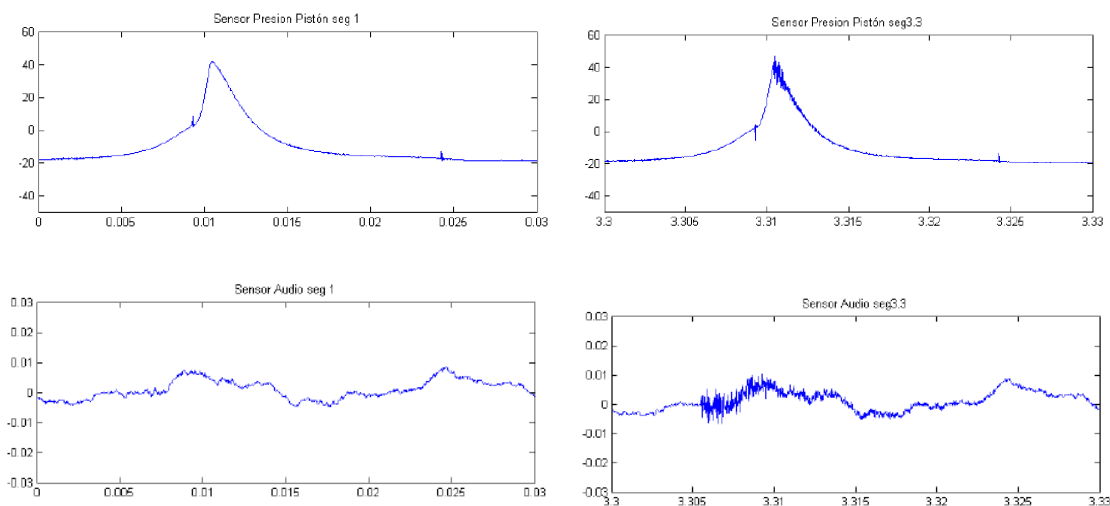


Fig. 377. Señales de presión en el cilindro y de sonido de una combustión normal (izquierda) y detonación (derecha).

Para la línea de aumento de potencia del motor, inicialmente se estudió la posibilidad de utilizar mezclas de metano-hidrógeno, realizando una serie de ensayos con diferentes mezclas y la utilización de diferentes dosados en el motor, lo que fructificó en un artículo en una revista internacional [27]. Lógicamente el empleo de metano, al no ser un combustible libre de carbono, conlleva la emisión de  $\text{CO}_2$ , trazas de  $\text{CO}$ , y mayor emisión de  $\text{NO}_x$  que con hidrógeno puro.

Otra posibilidad de cara al aumento de potencia y sin emisiones de carbono es la

sobrealimentación, la cual se ensayó inicialmente mediante el empleo de un soplador industrial con resultados positivos. El siguiente paso será adaptar un motor sobrealimentado para su funcionamiento con hidrógeno, para lo cual se dispone de un motor de un vehículo VW Polo TSI 1.4 con turbocompresor y compresor volumétrico donado por VW Navarra para la investigación. Se espera en un futuro próximo adaptar el motor sobrealimentado aumentando así la potencia desarrollada, y más adelante aplicarlo a un vehículo comercial.

## 4 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Roadmap for a low carbon economy by 2050 (EC, 2011a).
- [2] European Commission's White Paper on transport (EC, 2011).
- [3] Ajanovic A. Renewable fuels: A comparative assessment from economic, energetic and ecological point-of-view up to 2050 in EU-countries. Vienna University of Technology, Energy Economics Group, Gusshausstr. 25-29/370-2, 1040 Vienna, Austria.
- [4] Agrafiotis, Christos; von Storch, Henrik; Roeb, Martin; et al. Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014;29:656-82.
- [5] Veziroglu A, Macario R. Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011;36:25-43.
- [6] Brouwer J. On the role of fuel cells and hydrogen in a more sustainable and renewable energy future. *Curr. Appl. Phys.* 2010;10:S9-17.
- [7] Rosenberg E, Fidje A, Espegren KA, et al. Market penetration analysis of hydrogen vehicles in Norwegian passenger transport towards 2050. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010;35:7267-79.
- [8] Park C, Kim C, Choi Y, et al. Operating strategy for exhaust gas reduction and performance improvement in a heavy-duty hydrogen-natural gas blend engine. *Energy* 2013;50:262-9.
- [9] White CM, Steeper RR, Lutz AE. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2006;31:1292-305.
- [10] Verhelst S, Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2009;35:490-527.
- [11] Escalante Soberanis MA, Fernandez AM. A review on the technical adaptations for



internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010;35:12134-40.

[12] Winter C-J. Hydrogen energy-abundant, efficient, clean: a debate over the energy-system-of-change. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009;34:S1-52.

[13] Wietschel M, Ball M, Seydel P. Hydrogen today. In: Ball M, Wietschel M, editors. *The hydrogen economy*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2009, pp. 254-70.

[14] Carr S, Premier GC, Guwy AJ, et al. Hydrogen storage and demand to increase wind power onto electricity distribution networks. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014;39:10195-207.

[15] Gandía LM, Oroz R, Ursúa A, et al. Renewable hydrogen production: performance of an alkaline water electrolyzer working under Emulated Wind conditions. *Energy Fuels* 2007;21:1699-706.

[16] Diéguez PM, Ursúa A, Sanchis P, et al. Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: experimental study and mathematical modeling. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008;33:7338-54.

[17] Ursúa A, Marroyo L, Gubia E, et al. Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009;34:3221-33.

[18] Wallner T, Lohse-Busch H, Gurski S, et al. Fuel economy and emissions evaluation of BMW hydrogen 7 mono-fuel demonstration vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008;33:7607-18.

[19] Lee SJ, Yi HS, Kim ES. Combustion characteristics of intake port injection type hydrogen fueled engine. *Int. J. Hydrogen Energy* 1995;20:317-22.

[20] Sierens R, Verhelst S. Experimental study of a hydrogen fuelled engine. *J. Eng.*

Gas Turbines Power 2001;123:211–6.

[21] Tang X, Kabat DM, Natkin RJ, Stockhausen WF. Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development. SAE Paper 2002. 2002-01-0242.

[22] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw Hill; 1989.

[23] Stockhausen WF, Natkin RJ, Kabat DM, et al. Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program. SAE Paper 2002. 2002-01-0240.

[24] Gillespie TD. Fundamentals of vehicle dynamics. SAE Publications; 1992.

Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June

[25] 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. Off J Eur Union 2007;L 171:1-16.

[26] Savva PG, Costa CN. Hydrogen lean-DeNO<sub>x</sub> as an alternative to the ammonia and hydrocarbons selective catalytic reduction (SCR). Catal. Rev. Sci. Eng. 2011;53:91-151.

[27] Diéguez PM, Urroz, JC, Marcelino-Sádaba S, et al. Experimental study of the performance and emission characteristics of an adapted commercial four-cylinder spark ignition engine running on hydrogen–methane mixtures. Appl. Energy 2014;113:1068-76.

